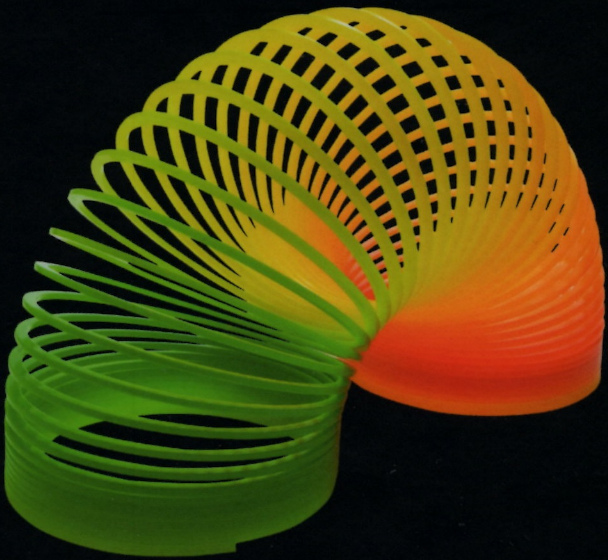
LA LEY DE HOOKE

HOOKE

Estiramientos para recuperar la forma



NATIONAL GEOGRAPHIC

ROBERT HOOKE es uno de los grandes de la ciencia del siglo XVII, pero su popularidad dista mucho de la que merece su obra. La ley que lleva su nombre y que versa sobre el comportamiento de los cuerpos elásticos es su aportación más conocida, pero ni mucho menos la única. Contemporáneo y gran rival de Newton, concluyó que el movimiento planetario era una cuestión mecánica y dio así un paso crucial hacia la idea de gravitación universal. Perfeccionó el microscopio y lo empleó en una infinidad de observaciones que plasmó en imágenes de una belleza solo equiparable a su importancia científica. Experimentador infatigable, desarrolló la primera cámara de vacío, uno de los primeros telescopios reflectantes y variados instrumentos meteorológicos y de medición. Y todavía halló tiempo para liderar la Royal Society y supervisar la reconstrucción de Londres tras el incendio de 1666. A nadie le extrañará, pues, que se le conozca como «el Leonardo británico».

LA LEY DE HOOKE

HOOKE

Estiramientos para recuperar la forma

NATIONAL GEOGRAPHIC

ENRIQUE GRACIÁN RODRÍGUEZ es licenciado en Ciencias Exactas y periodista científico. Su trabajo se centra en la divulgación científica, colaborando en diversos medios de comunicación, y en la didáctica de las matemáticas.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 27, 45, 77ad, 111, 135a; Arriva436: 151b; Robert Boyle: 33; ChrisO: 87; Michael Dunn: 99; Alberto Durero/Museo Metropolitano de Arte, Nueva York: 124; Rita Greer: 33ai, 33b, 77b, 105ad, 151a; Iglesia de Santa Elena, Londres: 135bd; Wenceslaus Hollar/National Portrait Gallery, Londres: 48; Robert Hooke: 51ai, 51ad, 51b, 55, 77ai, 105ai, 105bi, 105bd; Thomas Hudson/National Portrait Gallery, Londres: 126; Johann Kerseboom/Historical Portraits, Londres: 25; Sir Godfrey Kneller/National Portrait Gallery: 149; Matt Kozlowski: 160; National Portrait Gallery, Londres: 44; Rama/Museo de Arte y de Historia de Neuchâtel, Suiza: 70; Gaspar Schott/Deutsches Museum, Múnich: 28; Daniel Schultz/Academia Polaca de Ciencias: 109; Justus Sustermans/Royal Museums Greenwich: 31; Philippe Joseph Tassaert: 92; Universidad de Estrasburgo: 135bi; Universidad Técnica de Múnich: 122.

ISBN: 978-84-473-7681-0
Depósito legal: B-18559-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

Cuando se menciona el nombre de Einstein nos viene a la mente la teoría de la relatividad, al igual que ocurre con Newton y la ley de la gravitación universal, y así como con tantas otras figuras ilustres de la historia de la ciencia cuyos nombres están asociados a descubrimientos que han supuesto cambios significativos en el paradigma científico. Sin embargo, cuando se hace referencia a Robert Hooke, a lo único que suele asociarse, en el mejor de los casos, es a una sencilla ley que se estudia por primera vez en el bachillerato y que tiene relación con muelles y resortes o, para ser más precisos, con el concepto de elasticidad. Se trata de la ley de Hooke, que dice que cuando sometemos un cuerpo elástico a una determinada fuerza, aparece siempre otra fuerza opuesta que trata de devolver el cuerpo a su estado original. Hooke, gracias a una serie de resultados experimentales, estableció una relación lineal entre la fuerza elástica recuperadora y la elongación del cuerpo elástico mediante una constante que depende de la naturaleza del material elástico y de la forma del cuerpo en cuestión. No se puede decir que sea un gran hallazgo, pero es una ley importante debido a sus numerosas aplicaciones. Y esto es todo lo que durante más de trescientos años se ha reseñado de Robert Hooke. Pero la ley de Hooke es la punta de un enorme iceberg bajo el que ha permanecido oculto uno de los científicos más importantes del siglo XVII, y también uno de los que peor ha sido tratado por la historia.

En la primera mitad del siglo XVII tuvo lugar el nacimiento de lo que se conoce como la Nueva Ciencia. Bajo la influencia de Francis Bacon se abandonó la escolástica y los principios aristotélicos que hasta entonces habían regido el pensamiento científico. En las nuevas maneras de hacer ciencia, el conocimiento surgió de la experiencia, de la observación y del contacto directo con la naturaleza. Ya no se trataba de llevar a cabo experimentos que confirmaran teorías previamente aceptadas como válidas, sino de establecer nuevas leyes en base a los resultados experimentales. En este nuevo escenario, Hooke fue uno de los protagonistas más relevantes.

Científicos de la talla de Thomas Willis, Christopher Wren o Robert Boyle, movidos por la curiosidad e incentivados por un afán creciente de conocimiento, convergieron en el tiempo y el espacio, a principios del siglo XVII y en las inmediaciones de Oxford, para constituir una sociedad científica que, bajo los auspicios de la masonería, nacería como el Colegio Invisible para acabar convirtiéndose luego en la Royal Society. Todos aquellos científicos, la mayoría pertenecientes a la aristocracia y con una sólida posición económica, construyeron sus propios laboratorios en los que habría de tener lugar el nacimiento de la Nueva Ciencia.

Hooke no tenía una buena posición económica ni era de buena cuna, pero poseía un enorme talento. Aquellos laboratorios necesitaban de nuevas herramientas, de dispositivos, especialmente diseñados para «torturar a la naturaleza», según una expresión utilizada frecuentemente por Hooke. De esta manera, Hooke fue contratado como criado o, si se prefiere, como ayudante por varios de esos científicos, construyendo para ellos las herramientas necesarias y también aprendiendo de todos ellos matemáticas, física, medicina o astronomía.

En este escenario, Hooke fue un inventor y un científico. Inventó el muelle de resorte plano que, como alternativa al péndulo, permitió la fabricación de relojes de bolsillo. Construyó la primera cámara de vacío, con la que Boyle y Hooke establecieron la ley de los gases. Construyó también el primer telescopio reflector tipo Casigrin y perfeccionó el microscopio compuesto, ambos con un poder de resolución que hasta entonces no se había alcan-

zado. Inventó molinos que se orientaban según la dirección del viento, las ventanas de guillotina, los cuadrantes mural y ecuatorial, el barómetro, el higrómetro y el anemómetro. Hooke también estableció el punto de congelación del agua como referencia de origen de temperaturas en el termómetro. Esta es una lista que puede llegar a ser larga, muy larga.

Como científico, Hooke se adelantó a los tiempos en descubrimientos tan importantes como la presencia del oxígeno en la combustión, el fenómeno de la capilaridad o la naturaleza ondulatoria de la luz. En geología, desarrolló ideas muy avanzadas para su época, estudiando cientos de fósiles, afirmando de manera rotunda su origen orgánico y anticipando teorías evolucionistas. Demostró que la Tierra giraba alrededor del Sol calculando la paralaje estelar. Aquí la lista también puede ser muy larga, pero entre todos sus descubrimientos científicos hay que destacar uno por su gran trascendencia. Mediante el estudio del movimiento de un péndulo cónico (también de su invención), Hooke estableció que debía existir una fuerza de atracción que el Sol ejercía sobre los planetas, una fuerza centrípeta que era la responsable de que la Tierra no siguiera una trayectoria rectilínea, sino que debido al desequilibrio producido por esta fuerza, se encontraba en un estado de constante caída, que era lo que provocaba su trayectoria curvilínea. Llegó a establecer que dicha fuerza era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separaba las masas. De esta forma, Hooke se adelantó a Newton en el establecimiento de la ley de la gravitación universal. Si bien es cierto que Newton proporcionó a la teoría el aparato matemático necesario —algo que Hooke no estaba en condiciones de hacer—, también lo es que Hooke fue el primero en conjeturar la teoría y servir al menos como inspiración para el establecimiento de lo que acabaría conociéndose como «gravitación universal», una fuente de inspiración que Newton nunca reconoció.

Además de inventor y científico, Hooke fue también un artista. Demostró ser un extraordinario dibujante y de habérselo propuesto seguramente habría llegado a ser un pintor de renombre. Con tan solo diez años ya poseía un talento especial para la pintura, hasta el punto de que consiguió una recomendación

para entrar como estudiante en uno de los talleres de pintura más importantes de Londres. Como dibujante, dejó una muestra en su obra más emblemática, la *Micrografía*, en la que legó treinta y ocho láminas que representan en su mayoría las observaciones que hizo a través del microscopio, que son de las mejores representaciones que se han hecho nunca y que todavía hoy en día no han perdido su poder de fascinación.

Otra de las facetas sorprendentes de Hooke es la de arquitecto. En la restauración de Londres tras el catastrófico incendio que sufrió en 1666, Hooke, junto con Wren, ocupó un papel protagonista, ya que no se limitó —como en un principio se le encargó— a organizar y supervisar las obras de reconstrucción, sino que llevó a cabo obras de nueva construcción como el Ragley Hall, el Warwickshire o su obra maestra, el Hospital de Bethlehem, obras por las que podría haber pasado a la historia como un arquitecto innovador y de extraordinario talento. También en esta especialidad hizo una aportación científica que resultaría crucial para la técnica arquitectónica de los siglos posteriores, el arco catenario como el arco perfecto de sustentación.

Una biografía puede partir de una serie de hechos aislados que, ordenados temporalmente, adquieren un significado. Con Hooke es diferente, la sucesión temporal de sus actividades científicas nos deja frente a un rompecabezas que hay que volver a recomponer. Este aparente desorden es debido a la propia personalidad de Hooke, a su tremenda curiosidad y a su gran capacidad para adentrarse rápidamente en terrenos desconocidos, abandonando de repente aquello que hasta ese momento ocupaba toda su atención, lo que ha motivado que en ocasiones se le tildara de superficial, de dejar para otros el trabajo duro, como en una ocasión le acusó Newton, haciendo una clara referencia al trabajo matemático que debía acompañar siempre a la fundamentación de una nueva teoría. La mente de Hooke era multidisciplinar y estaba capacitada para hacer varias cosas simultáneamente. Y no es del todo cierto que abandonara sus líneas de investigación, pues en más de una ocasión publicaba resultados inesperados sobre algo en lo que había estado investigando muchos años antes.

El pensamiento científico de Hooke, que prescindía de cualquier idea preconcebida, estaba muy acorde con la época que le tocó vivir. Era un pensamiento mecanicista que trataba de abolir los tintes animistas heredados del pasado. Cuando se decía que un gas trataba de huir del horror al vacío, Hooke afirmaba que lo hacía debido a la presión que ejercían sus partículas en movimiento. Cuando todos aseguraban que los procesos de combustión eran debidos a la presencia del misterioso flogisto, Hooke experimentaba con el gas nitroso, anticipándose al descubrimiento del oxígeno. Él sabía que los objetos de la naturaleza no llevaban implícita una orden divina que les impelía a comportarse de una determinada manera, sino que se regían por leyes mecánicas que podían deducirse de la observación y, en este sentido, Hooke fue muy claro cuando afirmaba que debemos ver en los instrumentos científicos una prolongación de nuestros sentidos.

Hooke no conoció en vida ningún tipo de gloria y sí muchas humillaciones. Fue casi siempre un criado al servicio de los demás. Como observa Carlos Solís en el prólogo a la edición española de la *Micrografía*, aunque fuera el *curator* de la Royal Society o incluso su secretario, como llegó a ser, siempre recibió un trato especial, en el sentido más negativo del término. A los demás miembros se les pedían las cosas por favor, a él prácticamente se le ordenaba que las hiciera. Un trato muy injusto si se tiene en cuenta que Hooke fue el pilar sobre el que se edificó la Royal Society como sociedad científica.

Hooke, como se ha dicho, ha sido un científico sepultado por la historia. La mayoría de sus escritos permanecieron ocultos, su instrumental científico desapareció. No se tiene ninguna imagen suya, lo que es bastante raro, ya que la hay de todos los miembros y secretarios de la Royal Society. Por no saber, ni siquiera se sabe dónde está enterrado.

El «rescate» de la figura de Hooke y de su obra no se inició hasta 1945, año en que se publicó una recopilación de sus trabajos en la *Early Science in Oxford* (Robert Gunther, Clarendon Press), una magna obra de catorce volúmenes gracias a la cual podemos conocer el alcance y la profundidad del pensamiento de una de las figuras más representativas y fascinante de la historia de la ciencia.

1635 Robert Hooke nace el 18 de julio en la parroquia de Freshwater, en la isla de Wight, Inglaterra.

1648 Muere su padre, el reverendo John Hooke, y Robert se traslada a Londres para aprender pintura en el estudio de sir Peter Lely. Poco después es admitido en la Westminster School.

1653 Entra en el Christ Church de Oxford becado como cantante del coro. El anatomista Thomas Willis le ofrece un empleo como asistente de química. Diseña diferentes artilugios para volar.

1655 Inicia estudios de astronomía con Seth Ward. Realiza sus primeras investigaciones sobre péndulos y resortes de muelles en espiral.

1658 Entra a trabajar en el laboratorio de Robert Boyle por recomendación de Thomas Willis. Fabrica, junto con Boyle, la primera bomba neumática. Aplicación del péndulo circular a los relojes.

1661 Publica su primer artículo que versa sobre fenómenos capilares y que será incluido más adelante en la *Micrografía*.

1662 Por recomendación de Boyle, Hooke es empleado como *curator* (comisario de experimentos) de la Royal Society por un salario de treinta libras al año más el derecho a residir en el Gresham College.

1663 Es elegido miembro de la Royal Society de Londres.

1664 En junio es contratado por sir John Cutler para llevar a cabo una serie de conferencias de contenido científico a cambio de una remuneración de 50 libras al año.

1665 Es nombrado profesor de Geometría en el Gresham College, con un salario adicional de 50 libras al año. Publica la *Micrografía*, su libro más emblemático.

1666 Año del gran incendio de Londres, en diciembre. Es nombrado inspector y supervisor de las obras de reconstrucción. Desde este año hasta 1676 diseña como arquitecto varios de los edificios más emblemáticos de la reconstrucción.

1677 Es nombrado secretario de la Royal Society.

1678 Publica *De potentia restitutiva*, su tratado sobre la elasticidad.

1684 Polémica entre Hooke y Newton en torno a la ley de la gravitación.

1703 Fallece el 3 de marzo en el Gresham College de Londres.

CAPÍTULO 1

El ayudante de laboratorio

Robert Hooke inició su carrera científica como ayudante de laboratorio. Su extraordinaria habilidad para construir todo tipo de dispositivos, unida a una agudeza mental que le permitía extraer conclusiones que iban más allá de las meras observaciones, sirvieron para que se forjara la personalidad de uno de los más insignes científicos del siglo XVII. En esta etapa de su vida estudió la capilaridad, la naturaleza de los gases y la combustión.

Al sur de Inglaterra, frente a la ciudad de Southampton, se encuentra la isla de Wight, la más grande de las islas de Inglaterra, y en su extremo occidental, junto a una hermosa bahía, cerca de los blancos acantilados de yeso, destaca Freshwater, la pequeña localidad en la que nació Robert Hooke el 18 de julio de 1635.

Su padre, John Hooke, fue, desde 1626, el párroco de la Iglesia de Todos los Santos, parroquia de Freshwater. Era descendiente de una antigua familia en la que casi todos sus miembros fueron ministros de la Iglesia. En 1622 se casó en segundas nupcias con Cecile Giles, con la que tuvo dos hijas, Anne y Katherine, y dos hijos, John, el primogénito, y Robert, el menor de los hermanos. Toda la familia vivía en Hooke Hill, en una pequeña casa, cerca de la iglesia parroquial, en la que las dos hermanas compartían una habitación y los dos hermanos otra. La relación del mobiliario que figura en el testamento del padre sugiere una clase media sin lujos, pero con los medios necesarios para poder mantener a la familia y promocionar al menos al primogénito.

De las dos hermanas poco se sabe, aunque en aquella época es fácil presuponer que se dedicarían a colaborar en los trabajos domésticos, a la espera de encontrar marido. El reverendo puso todos sus esfuerzos en la educación de su primogénito John, al que envió a Newport, donde estuvo trabajando durante siete años como aprendiz de comercio y allí finalmente se casó con la

hija de un comerciante, estableciéndose en una tienda de comestibles de la que acabó siendo propietario. Robert, el menor de los hermanos, no suponía una buena inversión de futuro, ya que era un niño débil y enfermizo, sin demasiadas expectativas de que llegara a alcanzar la edad adulta. Quizá en otras circunstancias hubiera sido enviado a un internado, pero debido a su delicado estado de salud, a su padre le pareció más rentable hacerse cargo de su educación personalmente, de manera que la infancia de Robert transcurrió dentro de los límites de Hooke Hill. Al principio, su padre trató de que siguiera su misma senda para acabar convirtiéndose en ministro de la Iglesia, pero muy pronto, los constantes dolores de cabeza que aquejaban a Robert durante su instrucción le hicieron desistir. Esta debilidad, supuestamente congénita, se veía sin duda favorecida por el tipo de alimentación que llevaba, ya que, debido a que su estómago toleraba muy pocos alimentos sólidos, apenas comía otra cosa que no fueran frutas, verduras o queso.

Dadas estas condiciones, Robert Hooke tuvo la mejor educación que un niño con sus cualidades innatas podía tener, ya que tenía la libertad de poder jugar, observar y preguntar. Muy pronto, el mundo que le rodeaba generó en él una curiosidad y una fascinación que ya no le abandonarían el resto de su vida. Las plantas, las piedras, los ríos o las nubes; los alimentos, el fuego del hogar o los sonidos en el interior de la iglesia, cualquier estímulo a sus sentidos despertaba su interés. Especialmente los objetos mecánicos. En una ocasión se encontró la maquinaria de un viejo reloj que había sido desechado, pero que conservaba intactas todas sus piezas. Reprodujo en madera cada una de ellas, reconstruyendo completamente el reloj y consiguiendo que funcionara de nuevo. A la edad de diez años, con la ayuda de su hermano, construyó un buque de guerra, una maqueta de un metro de largo. Lo tenía todo, palos, velas, jarcias y hasta cañones. Pero lo más asombroso, sin duda, era que los cañones disparaban. Estas actividades infantiles no solo mostraban una extraordinaria habilidad manual, sino que también eran el inicio de una mente inquieta que sería capaz de ejercer sobre los demás la misma fascinación de la que él era sujeto.

Además de su capacidad de observación y de sus habilidades manuales, Robert tenía capacidades artísticas notables. Muy pronto aprendió los secretos de la música, un lenguaje que en él parecía ser natural y que le llevó a ser un buen cantante y años más tarde un buen intérprete de órgano. Pero donde realmente llegó a demostrar su mayor talento artístico fue en la pintura, un mundo que descubrió a edades muy tempranas y de una manera un tanto casual.

«No deberíamos confundir nuestras mentes con ideas ininteligibles de las cosas, que no conducen al conocimiento y a la práctica, sino que acaban en el asombro y la confusión.»

— Robert Hooke.

Cuando Robert tenía doce años, recibieron en Hooke Hill la visita de un pintor profesional. Se trataba de John Hoskins, un miniaturista que con el tiempo llegaría a ser pintor oficial en la corte de Carlos I. Atraído por los hermosos paisajes de la isla de Wight, Hoskins estaba haciendo un recorrido por la zona, localizando parajes que le pudieran servir como tema para sus lienzos. Robert observó fascinado los bocetos, las telas, los carboncillos, pinceles, paletas y pigmentos, y en la primera ocasión en que el pintor se ausentó se puso manos a la obra.

En un primer momento, Hoskins iba a poner el grito en el cielo porque aquel mocoso había estado utilizando sus utensilios sin haber pedido permiso a nadie, pero cuando vio lo que Robert había hecho se quedó sin habla. Varios de los cuadros que había en la casa habían sido reproducidos con una perfección absoluta. Hoskins pensó que aquel escuálido niño se había pasado toda su corta vida pintando, pero cuando descubrió que aquella era la primera vez que tomaba los pinceles, no abrigó dudas de que se encontraba ante la presencia de un genio en ciernes.

Fue entonces cuando Hoskins decidió recomendarle encarecidamente a su padre que pusiera a su hijo en manos de un maestro. Si tenía posibilidades de enviarlo a Londres, él podía escribirle una carta de recomendación para que trataran de aceptarle

en el taller de Peter Lely, un reconocido maestro de la escuela holandesa.

El padre de Robert padecía ictericia, y en 1648, después de una larga crisis, falleció víctima de esta enfermedad. Su testamento favoreció claramente al hermano mayor, al que legó ocho piezas del mobiliario de la casa, entre las que estaba incluida una cama —en aquella época se trataba de uno de los muebles más valiosos— y también la mayor parte del dinero. El resto de objetos de valor, entre los que estaban incluidas las ventanas de vidrio, los legó a las hermanas. Robert tampoco figuraba en esta última lista y finalmente su herencia quedó reducida a 40 libras, varios libros y algo de ropa, concretamente un peto.

Dadas las circunstancias, su madre decidió que lo mejor que podía hacer era enviar a su hijo a Londres, para que probara suerte con el maestro que le había recomendado Hoskins.

LONDRES

En la actualidad no existe ninguna imagen de Hooke. Nadie certifica como válida ninguna de las que se conocen, por lo que no podemos saber con certeza cuál era realmente su aspecto físico. En 1710 existía en la Royal Society un retrato suyo que estaba junto a uno de Boyle. De ello da fe un testimonio de la época, Zacarías von Uffenbach, un reconocido anticuario alemán que visitó la institución aquel año y que asegura además que se trataba de un buen retrato, pero nadie ha podido dar nunca con él. Tampoco figura ninguna imagen suya en la portada de las *Obras póstumas* que fueron editadas por la Royal Society en 1710, lo que resulta un tanto extraño, ya que era costumbre hacerlo así en las ediciones de lujo. Y es que, en este sentido, Hooke parece haber sido víctima de un extraño conjuro para borrar de la historia cualquier rastro suyo.

En cualquier caso, las únicas referencias que se tienen del aspecto físico de Robert Hooke provienen de los comentarios escritos por gente que le conoció personalmente. La mayoría de

ellas son tendenciosas y exacerban sus defectos físicos, que indudablemente tenía, para sugerir un perfil psicológico más próximo a la imagen de Cuasimodo que a la de un insigne miembro de la Royal Society. Como es el caso de la descripción que hace Richard Waller, de un Hooke en edad avanzada, refiriéndose a él como una persona retorcida y despreciable, piel y huesos, blanco y extremadamente delgado, con nariz corta y fina, frente grande, boca de gesto vil y afilada barbilla, cabello oscuro, largo y descuidado, con la espalda torcida debido a las demasiadas horas que había estado inclinado sobre los tornos y los microscopios. Y ojos vivaces.

> «La verdad es que la ciencia de la naturaleza ha sido durante mucho tiempo obra tan solo del cerebro y de la fantasía, siendo ya hora de que retorne a la sencillez y se fundamente en las observaciones de las cosas materiales y obvias.»
>
> — Robert Hooke.

Quizá la imagen más fiable sea la descrita por John Aubrey (1626-1697) en una de sus breves piezas biográficas cuando habla de un Hooke en edad madura y en pleno apogeo de su capacidad creativa, refiriéndose a él como hombre de estatura mediana y caminar torcido, de mirada sagaz y vivaracha —en lo referente a la mirada coinciden todas las descripciones—. Aire delicado, cabello marrón abundante y húmedo —lo de húmedo es una acotación que quiere poner de manifiesto la calidad del pelo, quizá el único signo de salud sobresaliente—. En cuanto al carácter, lo define como un hombre templado y moderado en el trato.

En cualquier caso, aquel adolescente que en 1648 caminaba por las calles de Londres para dirigirse al estudio de pintura de sir Peter Lely era un ser probablemente marcado por una genética defectuosa. Varios autores coinciden en hacer un diagnóstico de cifosis, una enfermedad degenerativa de la columna vertebral que provoca la aparición de una joroba y que para Hooke fue una fuente inagotable de dolores durante toda su vida. Si además se

tienen en cuenta las demoledoras jaquecas que le asolaron ya desde su infancia, problemas digestivos, insomnio y trastornos de la piel, no se puede esperar menos que una persona irritable y de carácter algo difícil.

Su paso por la escuela de pintura de sir Peter Lely fue breve. El motivo que adujo el propio Hooke fue que los vapores químicos de las pinturas y los barnices le provocaban dificultades respiratorias. Pero también aseguró que el tiempo que había pasado en aquel taller había sido más que suficiente para aprender todo lo que necesitaba saber sobre técnicas de pintura. Es muy probable que así fuera, ya que Hooke no abrigaba intenciones de convertirse en pintor. Años más tarde, tanto las magníficas ilustraciones que adornaron sus obras, como los proyectos que realizó cuando trabajó como arquitecto, pusieron de manifiesto unas técnicas de dibujo más que notables.

WESTMINSTER

Hooke pasó directamente del estudio de Lely a la Westminster School, la que sin duda era la escuela más prestigiosa de Londres y que por entonces estaba bajo la batuta —y la vara— de su más celebérrimo director, el doctor Richard Busby (1606-1695).

El ingreso de Hooke en la Westminster es un tanto sorprendente y no está documentado. A pesar de que se le pueda suponer un gran bagaje de méritos personales, en aquella época era prácticamente imposible que un joven con las condiciones económicas y sociales de Hooke pudiera entrar sin más en una institución de esas características. Lo más probable es que alguna persona influyente de Londres, quizá el mismo Aubrey, su biógrafo, con el que llegaría a mantener una sólida amistad, lo aceptara bajo su tutela y lo recomendara al doctor Busby.

El reverendo doctor Richard Busby fue una figura legendaria en lo que a la historia de la pedagogía inglesa se refiere. Director de la Westminster School desde 1638, escribió y editó tratados originales, entre los que se incluyen gramáticas de latín y griego,

que fueron utilizadas durante siglos. También es famoso por sus castigos corporales, que sin duda nunca puso en práctica sobre Hooke, al que trató siempre con una especial deferencia. El doctor Busby ambicionaba formar en su escuela a intelectuales que proyectaran toda su valía en la sociedad y debió de ver en Hooke una clara promesa de futuro. Una prueba de su trato de favor es que Busby le permitió habitar en sus propias dependencias. A Robert se le veía poco por las aulas, ya que la mayor parte del tiempo lo pasaba en la biblioteca o en su habitación, lo que abunda en el trato de favor que Busby le dispensaba.

En poco tiempo, Robert dominó el latín y el griego, adquirió conocimientos de hebreo y aprendió a tocar el órgano. En tan solo una semana asimiló los seis primeros libros de los *Elementos* de Euclides. También trabajó en diferentes tipos de maquinarias. Parece ser que durante su estancia en Westminster llegó a inventar una treintena de máquinas voladoras, pero nada se sabe de su éxito, dado que no ha quedado ninguna documentación sobre el tema.

Cuando tenía dieciocho años, Robert terminó lo que podríamos considerar su primer ciclo de enseñanza. Hooke estaba preparado para acceder a la universidad, o para ser precisos, en su caso, para entrar en los ambientes universitarios. Estaba preparado intelectualmente, aunque muy lejos de estarlo a nivel social y económico.

OXFORD

La mayoría de los científicos ingleses más importantes de la primera mitad del siglo XVII fueron, con muy pocas excepciones, de noble cuna, lo que era sinónimo de una buena posición social y económica, y disponían, por tanto, de medios y de tiempo para desarrollar una actividad de investigación científica. El porqué un grupo de personas de perfiles similares e intereses comunes acabaron convergiendo en un mismo lugar y en un mismo tiempo obedece a diferentes razones que no vamos a analizar aquí, pero

el caso es que muchos de ellos se movieron en un entorno muy próximo al Christ Church de Oxford, en centros que han llegado a ser emblemáticos, como el Gresham College, el Wadham o el Merton y también, de forma asidua, en los cafés de los alrededores, a los que periódicamente asistían formando tertulias científicas que se organizaban de forma improvisada y de las que Hooke llegaría, con el tiempo, a ser uno de los más fieles asiduos.

«[...] los geómetras que entienden la teoría y los cálculos carecían de experimentos y ensayos para ver si la naturaleza seguía realmente los métodos que los artistas suponían con sus teorías.»

— Robert Hooke.

Cuando en 1653 Hooke entró en el Christ Church de Oxford, lo hizo becado como cantante del coro. Tras la abolición de la Iglesia anglicana, hacía ya diez años que el coro había dejado de ser un coro litúrgico y empezaba a actuar como institución seglar de la universidad.

Las buenas dotes de Robert para el canto y su talento como organista le sirvieron para revalidar dicha beca. Al comienzo de su estancia en el Christ Church, también trabajó al servicio de un tal Mr. Goodman, del que muy poco se sabe. El ver a Robert Hooke asistiendo regularmente a clases en la naciente Universidad de Oxford sería dar una imagen completamente distorsionada de su actividad como estudiante y también de lo que era aquella universidad entonces; de hecho, el único título que obtuvo de dicha institución fue el de Masters of Arts.

El escenario de la actividad universitaria era en realidad muy diferente al actual. La mayoría de científicos era gente aventurera que llegaba a Londres con una idea en la cabeza, con un proyecto que querían desarrollar, para lo cual necesitaban de un laboratorio, es decir, de un espacio, del instrumental adecuado y de uno o más ayudantes. Y es aquí donde Hooke encontraría sus primeras

oportunidades de trabajo, ya que no solo tenía una extraordinaria habilidad para construir todo tipo de dispositivos, sino también para diseñarlos, para inventarlos, para crear la herramienta que mejor se adecuara a cada experimento.

Durante un período de cinco años, Hooke estuvo trabajando como ayudante a la sombra de varios científicos, y de cada uno de ellos aprendió algo que con el tiempo resultaría vital para sus propias investigaciones. Cabe destacar su colaboración con John

ROBERT BOYLE


Retrato de Robert Boyle por Johann Kerseboom hacia 1689.

Robert Boyle nació el 25 de enero de 1627 en Lismore, Waterford, Irlanda. Hijo de un acaudalado aristócrata, fue el séptimo hijo de un total de catorce hermanos. A la edad de ocho años, ingresó en el colegio de Eton, cerca de Windsor, en Inglaterra, en el que permaneció tres años, transcurridos los cuales inició un viaje por Europa de la mano de un preceptor. No regresó a Inglaterra hasta 1644, estableciéndose en el castillo de Stalbridge, en Dorset. No llegó a casarse nunca y vivió casi toda su vida con su hermana Katherine, la que ejerció en él una gran influencia, ya que por su mediación conoció a la mayoría de intelectuales que habrían de marcar los primeros períodos de su formación como científico. Boyle está considerado como uno de los científicos más influyentes de la primera mitad del siglo XVII. Sus aportaciones a la ciencia abarcan campos tan dispares como la química, la medicina, la electricidad o el magnetismo. Aunque su resultado experimental más conocido es la ley de los gases, hizo otros descubrimientos importantes, como que el sonido no puede transmitirse en el vacío, la diferencia existente entre mezclas y compuestos o el establecimiento de la teoría corpuscular de la materia —en estos dos últimos también realizaron importantes aportaciones otros científicos, entre los que se encontraba John Dalton (1766-1844)—. Robert Boyle murió de parálisis el 31 de diciembre de 1691.

Wilkins (1614-1672), el que fue primer secretario de la Royal Society, que introdujo a Hooke en los secretos de la criptografía, técnica que años más tarde utilizaría para ocultar mediante mensajes cifrados algunos de sus descubrimientos. De hecho, Wilkins fue autor del primer libro de criptografía que hubo en lengua inglesa y creador de un lenguaje sintético que podía ser utilizado en los razonamientos filosóficos con independencia del idioma de origen. Se planteó también la posibilidad de diseñar un viaje a la Luna y construyó una colmena transparente para estudiar el comportamiento de las abejas. Es notable su estudio sobre el movimiento continuo, para el que tuvo que construir una serie de ingeniosos mecanismos, contando para ello con la inestimable ayuda de Hooke.

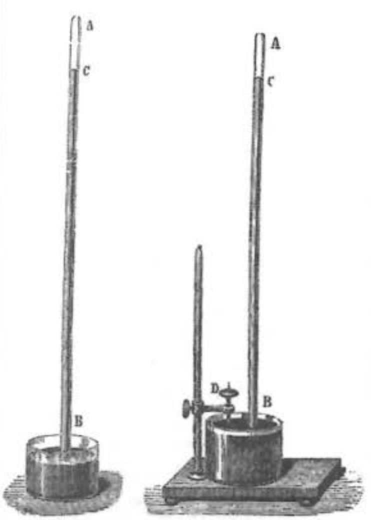
Cabe resaltar que los resultados de estas investigaciones fueron publicados por Wilkins en inglés, en un libro que llevaba por título *La magia matemática*, ya que el latín era una lengua culta, propia del lenguaje científico, y Wilkins quería que sus resultados llegaran a un sector más amplio de la población. La divulgación de la ciencia era uno de los objetivos que se había propuesto aquel grupo de investigadores, un objetivo en el que Hooke acabaría participando muy activamente.

Hooke también trabajó como ayudante de Christopher Wren (1632-1723), con el que le unió una sólida amistad que perduró durante muchos años y con el que se inició en la construcción de telescopios y en las diferentes técnicas de la observación astronómica.

Con Thomas Willis (1621-1675), médico famoso por sus estudios de la anatomía y funcionalidades del cerebro, Hooke aprendió las técnicas de disección que serían cruciales para sus posteriores investigaciones sobre la respiración. Fue precisamente Willis quien recomendó a Robert Boyle (1627-1691) que contratara a Hooke como ayudante de laboratorio, y además de tomarlo como ayudante asalariado, Boyle le ofreció también alojamiento. Hooke empezó a trabajar con Boyle en 1658 y permaneció con él hasta 1664. De todas las colaboraciones que mantuvo durante este período, esta fue sin duda la más importante, ya que supuso el inicio de la carrera científica de Hooke.

EL EXPERIMENTO DE TORRICELLI

El físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), discípulo de Galileo, fue el primero en llevar a cabo una medición precisa de la presión atmosférica. Para ello dispuso un largo y delgado tubo de vidrio abierto por uno de sus extremos, lo llenó de mercurio y lo colocó boca abajo en una cubeta que también estaba llena de mercurio. Fue entonces cuando observó para su sorpresa que la columna de mercurio había bajado, dejando un espacio libre en el extremo del tubo. Llegó entonces a la conclusión de que el peso del mercurio había sido equilibrado por el de la masa de aire que se distribuía uniformemente por la superficie de la cubeta. Si se igualan la presión del aire y la del mercurio, es fácil demostrar que la presión es directamente proporcional a la altura de la columna de mercurio. Torricelli midió dicha altura obteniendo un resultado de 760 mm que, a partir de ese momento, se consideró como la presión «normal» del aire en la atmósfera. Este experimento, realizado en 1643, supuso el descubrimiento de la presión atmosférica y los principios básicos del barómetro.



Grabado del experimento de Torricelli contenido en los libros de Camille Flammarion (1923).

LOS PROYECTOS DE BOYLE

En 1641, en el viaje que Boyle hizo por Italia, pasó un invierno en Florencia, donde tuvo ocasión de conocer de primera mano las experiencias de Galileo y Torricelli en relación a la caída libre de cuerpos. Sabía que en este problema no se obtendrían resultados

LOS HEMISFERIOS DE MAGDEBURGO

Otto von Guericke (1602-1686) fue un físico alemán que llevó a cabo los primeros estudios importantes que se hicieron sobre la presión atmosférica. Fue el artífice del famoso experimento conocido como los «hemisferios de Magdeburgo», que llevó a cabo en 1654 en la ciudad alemana que lleva ese nombre. Para ello hizo construir dos grandes semiesferas de cobre huecas que unió mediante juntas estancas que no permitieran el paso del aire. A continuación, a través de un orificio que había en una de las semiesferas, extrajo todo el aire contenido en el recipiente, provocando así el vacío en el interior de las mismas. El resultado fue que sobre la superficie de las esferas actuó la presión atmosférica sin que se viera compensada por ninguna otra fuerza en el interior de la esfera. Al tratarse de una superficie relativamente grande —unos 500 litros de capacidad—, la fuerza ejercida por la presión atmosférica podría llegar a romperlas, por lo que era necesario construirlas con un material resistente. Para poner de manifiesto dicha fuerza, Von Guericke sujetó mediante un arnés a cada extremo de las esferas un tiro de ocho caballos que, a pesar de su continuado esfuerzo, no consiguieron despegar las esferas entre sí. Luego soltó los arneses, abrió la válvula, el aire entró de nuevo en las esferas, de manera que la presión atmosférica ya actuaba otra vez tanto fuera como dentro de las esferas, y estas se separaron con facilidad, causando el asombro de todos los presentes. Se trataba de un experimento científico que a su vez contenía unas importantes dosis de espectáculo que el propio Von Guericke se cuidó de alentar convocando para el experimento a un gran número de personas, entre las que figuraban algunos ilustres de la época, que le imprimieron al evento el sello de seriedad que requería como experimento científico. Los hemisferios de Magdeburgo se convirtieron así en un acontecimiento popular, de lo que da buena muestra los numerosos grabados que se hicieron en la época.



Grabado en el que se representa el experimento de los hemisferios de Magdeburgo.

satisfactorios hasta que el experimento no se llevara a cabo en un espacio en el que se hubiera realizado un vacío total.

En aquella época existían dos corrientes enfrentadas. Por un lado estaban los plenistas, seguidos por los científicos franceses, que se adherían a las teorías de Descartes y afirmaban que todo estaba «lleno» —lleno de lo que fuera, pero lleno—. Por otro lado estaban las corrientes científicas inglesas, adscritas a las teorías de Bacon, que defendía la posible existencia de un vacío absoluto.

Blaise Pascal (1623-1662) había puesto a prueba el hecho de que la altura de la columna de mercurio en el experimento de Torricelli podía variar en función de la altitud a la que se realizara el experimento. Para ello, había realizado mediciones en lo alto del monte Puy de Dôme que le permitieron comprobar que la altura de la columna era menor y que ello era debido a la menor presencia de la masa de aire y no al horror al vacío, como expresó casi literalmente en sus escritos. Boyle decidió ignorar los debates metafísicos en torno al vacío y prefirió centrarse en los fenómenos de elasticidad y enrarecimiento del aire. De manera que, con la cámara de vacío, Boyle no solo quería establecer de forma experimental el vacío, lo que le permitiría estudiar la caída de graves, sino que también se proponía estudiar las propiedades físicas y químicas del aire.

En 1652, Boyle intentó establecerse en Irlanda, país en el que tenía varias propiedades, pero el ambiente cerrado y algo reacio a las nuevas ciencias le hicieron renunciar a instalar allí sus laboratorios. Dos años más tarde se trasladó a Londres y le alquiló varias habitaciones a un boticario en el University College de Oxford. Y allí sería donde nacería el que está considerado como el experimento más emblemático de Boyle, la bomba neumática o cámara de vacío. Pero para ello iba a necesitar una, y de la única de la que se disponía en aquella época era la que Otto von Guericke había diseñado, pero que resultaba poco adecuada para trabajar en un laboratorio, ya que era demasiado voluminosa y requería de al menos dos personas para hacer el vacío en su interior. Finalmente, sería su ayudante, Robert Hooke, quien sería capaz de construir una bomba de vacío que reuniese las características necesarias.

LA BOMBA NEUMÁTICA

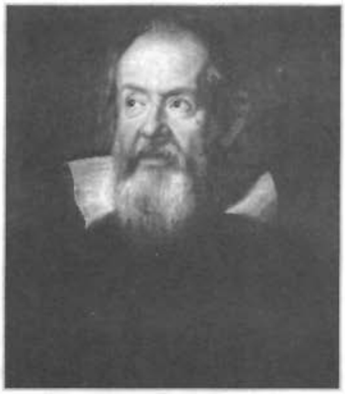
Construir una cámara de vacío de las características que requería Boyle era una empresa realmente difícil. Por aquel entonces existían en Londres empresas dedicadas a la extracción de líquidos mediante bombas, que se empleaban básicamente para drenar pantanos. Hay constancia de que en un primer momento Boyle acudió a ellas, a las *pumper*, pero con resultados muy frustrantes.

Hooke construyó un recipiente de vidrio en el que debía generarse el vacío y que consistía en una esfera de quince centímetros de diámetro, a la que llamaba el «receptor», que en la parte superior tenía instalado un ancho tapón de latón para permitir el acceso al interior de la zona de experimentación. Para ello, había también un tercer tapón de forma cónica, engrasado con aceite, para que pudiera ser girado sin romper los sellos de vacío y que tenía sujeto un hilo con el que se podían accionar los diferentes dispositivos de experimentación. El resultado era que se podía tener una visión clara a través del vidrio y un acceso fácil a la cámara interior. El vacío en el interior de la esfera de vidrio se producía manualmente mediante un émbolo de latón situado en la parte inferior de la misma. Al accionar el émbolo arriba y abajo se iba extrayendo el aire del interior de la esfera de vidrio.

Las primeras cámaras que construyó Hooke tenían problemas con el sellado, lo que repercutía en el tiempo durante el cual el vacío podía mantenerse en el interior, que al principio no pasaba de algunos minutos. Pero poco a poco y a base de muchas pruebas con diferentes materiales, consiguió crear una bomba de vacío que cumplía con las expectativas de Boyle. Otras bombas construidas posteriormente en Europa siguieron el diseño de Hooke, ya que tenía varias características que lo hacían apto para la experimentación en los laboratorios. Hay que tener en cuenta que se trataba de un instrumento difícil y caro de fabricar.

Durante la década de 1660, poseer una máquina de vacío era un lujo al que muy pocos podían tener acceso. Solo se tiene no-

LA CAÍDA DE GRAVES



Retrato de Galileo Galilei por el pintor flamenco Justus Sustermans en 1636.

Galileo sostenía la hipótesis de que la caída libre de cuerpos —cuando la única fuerza que actúa sobre ellos es la de la gravedad— se produce con aceleración constante. El que un globo y un plomo de la misma masa tarden un tiempo diferente en recorrer una misma altura en caída libre es debido únicamente a las fuerzas de rozamiento. Galileo intentó varios experimentos para comprobar su teoría. Para medir el tiempo de caída usó diferentes métodos que iban desde utilizar péndulos hasta tomar como referencia los latidos de su corazón. Curiosamente, el que mejores resultados le dio fue el que puso en práctica tocando el laúd. Se fijaba en cuál era la última nota que había tocado cuando uno de los cuerpos llegaba al suelo y medía así el tiempo total del recorrido. Sus teorías fueron muy discutidas, sobre todo por Descartes, que entre otras cosas era de la opinión de que en el vacío los cuerpos no eran susceptibles de alcanzar ningún tipo de velocidad. Por aquel entonces, la única manera de discutir las teorías cartesianas era utilizando razonamientos de carácter metafísico. Boyle se propuso hacerlo mediante observaciones experimentales que consistieran en medir la caída de graves en ausencia total de rozamientos, algo que solo se podía hacer si el experimento tenía lugar en el vacío.

ticia de la existencia de cuatro de ellas: la que construyó Hooke en Oxford, que era propiedad de Boyle; la que el mismo Boyle cedió a la Royal Society en 1661; otra en París que pertenecía al grupo de Montmort, y una cuarta en La Haya. Esta última había sido fabricada por el neerlandés Christiaan Huygens (1629-1695) y estaba basada casi en su totalidad en el modelo de Hooke, incluso incluía los dispositivos de este para calcular la velocidad de caída de graves y la variación de presión de diferentes objetos a diferentes alturas bajo el nivel del mar.

Uno de los experimentos más interesantes que se llevaron a cabo en la cámara de vacío fue el que tenía relación con los procesos de combustión de diferentes sustancias. Quemaron velas, madera y carbón, observando lo que sucedía cuando se apagaban. La trayectoria del humo que ascendía por la pared interior del receptor les llevó a plantearse que, a pesar de sus esfuerzos, era muy probable que todavía quedara aire residual en el interior de la cámara.

Hooke hizo una observación importante cuando colocó una vela encendida y comprobó que el tiempo que tardaba en apagarse dependía de la presión de aire que hubiera dentro de la cámara. Con este resultado llegó a tres conclusiones. Primero, que el aire tenía alguna propiedad directamente relacionada con el proceso de combustión de la vela; luego, que era posible alterar de forma mecánica el volumen del aire, lo que habría las puertas a establecer una relación entre la presión y el volumen de un gas, y por último, que de la misma manera que el aire podía ser comprimido, también podía ser expandido para llenar por completo el recipiente en un factor que incluso determinó numéricamente. Estos resultados condujeron de forma directa a establecer la relación entre el volumen y la presión de un gas que se mantiene a temperatura constante y que viene dada por la expresión:

$$P \cdot V = \text{Cte.}$$

Robert Boyle publicó estos resultados en 1662 en una obra titulada *A defence of the doctrine*, donde se limitaba a afirmar que «la presión y la expansión están en proporción recíproca». No lo planteó como una ley, sino como el resultado final de un gran número de experimentos. Quien sí lo introdujo como una ley física fue el físico francés Edme Mariotte (1620-1684), que la expuso como tal en una obra titulada *De la nature de l'air* («Sobre la naturaleza del aire»), publicada en 1679. El caso es que esta ley se conoce en Inglaterra como «ley de Boyle» y en Francia como «ley de Boyle-Mariotte», aunque muchos historia-



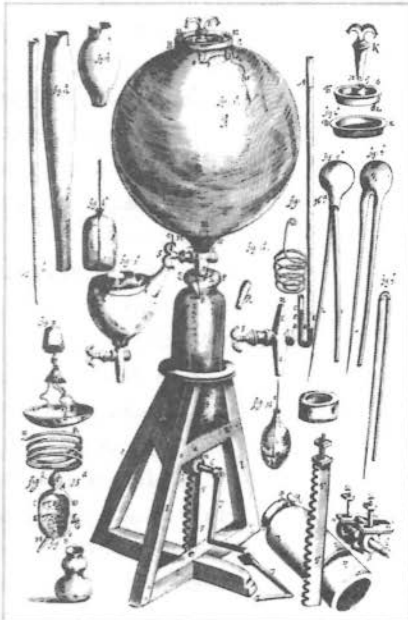




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Retrato de Robert Hooke según las descripciones de sus colegas Aubrey y Waller. Óleo pintado por Rita Greer en 2004.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Esquema de la bomba neumática de Boyle.

FOTO INFERIOR:
En 1658, Hooke ayudó a Boyle en sus experimentos y ambos desarrollaron la bomba neumática. En la imagen, Hooke junto a la bomba neumática, siendo supervisado por Boyle. Óleo pintado por Rita Greer en 2007.

dores de la ciencia coinciden en que lo justo sería llamarla «ley de Boyle-Hooke».

En sus investigaciones sobre la posibilidad de que algunos materiales no necesitaran la presencia del aire para poder arder, Hooke llegó a un resultado que acabaría teniendo consecuencias en la industria armamentística de la época. La pólvora ya era conocida y se sabía de su poder expansivo para utilizarla como explosivo, pero había problemas si se quería multiplicar dicha fuerza confinando el material en recipientes cerrados, ya que el mecanismo de ignición, por muy ingenioso que fuera, requería inevitablemente de la presencia de aire. De todos era sabido que una lupa concentra los rayos solares de manera que, con paciencia, puede prender unas briznas de paja. Y este era uno de los sistemas que se utilizaban para prender la pólvora contenida en un cilindro, haciendo incidir, mediante lentes, un rayo de luz solar a través de un pequeño orificio practicado en el cilindro. El sistema tenía dos serios inconvenientes: uno, el tiempo que se tardaba en conseguir que la pólvora prendiera, y el otro, el más grave, que era impracticable en los días nublados, que en Inglaterra eran la mayoría.

Thomas Willis, el médico para el que Hooke había trabajado antes de convertirse en ayudante de Boyle, había encontrado una sustancia capaz de provocar la explosión de una carga de pólvora por percusión, sin necesidad de la presencia de fuego o de calor. Willis bautizó a este elemento con el nombre de «fulminato de oro».

Hooke pidió a Willis que le facilitara unas muestras de fulminato de oro y diseñó un ingenioso dispositivo mediante el cual conseguía percutir el fulminato en el interior de la cámara de vacío; de hecho, había diseñado el mecanismo de «gatillo-percutor» de un arma de fuego. El fulminato explotó y pudo demostrar así que algunas sustancias podían entrar en combustión sin la presencia de aire, que era lo que quería, y de paso introdujo la idea de utilizar cartuchos en las armas de fuego, un dispositivo que acabaría imponiéndose de manera definitiva a lo largo del siglo XVII.

Estas observaciones llevaron a Hooke a especular con la posibilidad de que el aire estuviera formado por dos sustancias diferentes, el «aire nitroso» y el «aire inerte». La primera, responsable de la combustión. Dedujo entonces que cuando en el interior de la

cámara no conseguía encender una vela era debido a la ausencia del nitroso. En cambio, el hecho de que el fulminato de oro sí pudiera ser encendido por percusión, en ausencia de aire, era debido a que probablemente el fulminato de oro contuviera el nitroso necesario para provocar la combustión.

El interés que los procesos de combustión habían despertado en Hooke le llevaron a investigar cómo estos actuaban en la simple llama de una vela. Para ello, construyó un sencillo dispositivo con finas placas de mica blanca para proyectar, mediante luz solar, la imagen de la llama sobre una pared y así analizar las diferentes partes que la componían. Observó que el interior de la llama no emitía luz y que la combustión se producía alrededor de esta. Parte de estos resultados fueron publicados años más tarde por Hooke, en 1665, en la *Micrografía* («Observación 16, de carbón») y posteriormente en 1677, en las *Conferencias cutlerianas*, en el artículo titulado «Lampas».

LA RESPIRACIÓN

Los experimentos con la bomba de vacío habían dejado muy claro un resultado: una llama se apaga mucho antes en el interior de un recipiente que no contiene aire que en otro que sí lo contiene. Este era un punto de partida para investigar procesos de combustión que afectaban a diferentes ramas de la ciencia. Hooke tenía la herramienta, el ingenio y la curiosidad suficiente para adentrarse en varios de ellos.

Uno de los temas candentes de la época era el de la posible relación que había entre la circulación sanguínea y la respiración. El primero en descubrir la circulación pulmonar fue el científico español Miguel Servet (1509-1553), que publicó sus resultados en 1553 en un libro titulado *Christianismi restitutio*, que no estaba enmarcado precisamente en el ámbito de la ciencia, sino en el de la teología, por lo que rápidamente fue clasificado como herejía y toda su obra fue a parar a la hoguera. En realidad, toda excepto tres ejemplares, gracias a los cuales se tiene noticia de su existencia.

La falta de cuidado en la quema sistemática de información se ha dado repetidas veces a lo largo de la historia, y cabría pensar que no es debida a la falta de competencia por parte de los inquisidores, sino a que de alguna manera estaba estipulado que parte de la información debía guardarse en el seno de la Iglesia como testimonio de la presencia del demonio en el espíritu de algunas mentes pensantes. Esto, a la larga, acabaría haciendo de la biblioteca del Vaticano uno de los centros de información científica más poderosos de la historia. Este desgraciado incidente llevó a que se atribuyera al médico inglés William Harvey (1578-1657) la paternidad del descubrimiento de que el bombeo del corazón era el responsable de la circulación sanguínea por todo el cuerpo a través de un sofisticado sistema de fontanería en el que había dos tipos diferentes de tuberías: las venas y las arterias.

«[...] las artes de la vida han estado durante demasiado tiempo aprisionadas en los oscuros talleres de los propios mecánicos, donde su desarrollo se veía impedido, sea por ignorancia o por propio interés.»

— Robert Hooke.

Se había observado que la sangre en las arterias tenía un color rojo más vivo que el oscuro y denso de las venas. Hooke relacionó este hecho con algún proceso de combustión que tenía lugar en presencia del aire nitroso, el mismo que intervenía en el proceso de combustión del fulminato de oro. Colocó dentro de la bomba neumática muestras de ambas clases de sangre, lo que le llevó a demostrar que el color de la sangre cambiaba en presencia del aire, cosa que no sucedía cuando se producía el vacío en el interior de la cámara. Estos resultados fueron publicados años más tarde por John Mayow (1640-1679) para describir el proceso de la respiración pulmonar, llegando a afirmar que era el componente nitroso del aire el que reaccionaba con la sangre, y que a su vez era el responsable de la contracción muscular. Esto, entre otras cosas, iba a llevar al abandono definitivo de la teoría, según la cual la función del corazón era la de regular el calor en el flujo

sanguíneo y no una pura función mecánica de bombeo, como se demostraría años más tarde. Existe documentación que prueba que Mayow trabajó mano con mano con Hooke en el laboratorio de Boyle. En la publicación de Mayow aparecida en 1674, en la que se exponen todos estos resultados, hay un reconocimiento explícito a las aportaciones de Hooke.

EL MAL DE ALTURA

Aunque algunos experimentos se realizaron en fechas posteriores a la época en que Hooke trabajó como ayudante con Boyle, los incluimos aquí por la estrecha relación que guardan con la cámara de vacío. Uno de los más importantes fue el que Hooke llevó a cabo a partir de la década de 1670 para establecer la relación que había entre la respiración y la presión de aire. Un par de años antes ya había podido establecer que el tiempo durante el cual un animal —para este experimento utilizó pájaros— podía mantenerse respirando en un recinto cerrado era proporcional al volumen de aire contenido en el recipiente.

Ahora, lo que hizo fue construir, a base de grandes toneles, un recipiente lo suficientemente grande como para que cupiera dentro una persona encogida, para luego poder extraer el aire del interior mediante la bomba neumática. Dado que no había ninguna posibilidad de hablar con los pájaros para tener un cambio de impresiones, Hooke decidió que, en esta ocasión, él mismo haría de conejillo de indias. Anotó los cambios fisiológicos que sufría conforme iba reduciendo la presión del aire en el interior y el tiempo que estos tardaban en producirse. En realidad, estaba experimentando con lo que hoy se conoce como «mal de altura». Se produjeron las reacciones típicas, como el dolor de oídos con la consecuente pérdida de audición. Pero muy pronto abandonó estas actividades por razones obvias. Una persona con su delicado estado de salud, frecuentes dolores de cabeza y problemas respiratorios no tenía mucho futuro en el interior de una cámara de descompresión. Incomprensiblemente, estos resultados, de extraordinario valor para poder comprender el papel que acaba-

ría teniendo el oxígeno en los procesos de combustión, quedaron en el olvido.

Sería demasiado arriesgado afirmar que Hooke fue el primero en abrir la vía que conduciría directamente al descubrimiento del oxígeno. Pero lo que sí hizo fue ampliar uno de los escenarios, el de los cuatro elementos, aire, fuego, agua y tierra, que durante siglos conformaron la visión del mundo. Y lo más importante era que lo había hecho por la vía de la experimentación y no de la especulación filosófica.

NITRO AÉREO, FLOGISTO Y OXÍGENO

La pólvora está compuesta por carbón, azufre y nitrato potásico. Este tercer compuesto es una sal que entonces recibía el nombre de «nitro». En los experimentos que se llevaron a cabo en la cámara neumática, se pudo comprobar que la mezcla formada por los dos primeros no ardía en ausencia de aire, algo que sí sucedía cuando se le añadía el tercero. De esto, Boyle y Hooke dedujeron que el aire contenía un principio activo necesario para la combustión al que llamaron «nitro aéreo». Sin saberlo, habían descubierto el oxígeno.

En la teoría de la combustión que figura en la *Micrografía*, Hooke se acercó mucho a la teoría correcta que supuso el descubrimiento del oxígeno. En ella plantea que el aire está formado por dos componentes, la que contiene el nitro, parte activa responsable de la combustión y la parte fija, que es inerte y que acabará formando parte de las cenizas con los restos de sustancias que no han combustionado.

A pesar de que Hooke había abierto una puerta que conducía directamente al camino correcto, acabó por imponerse la teoría del flogisto, que prevaleció en el escenario científico durante cien años más. El flogisto era el elemento responsable de que un cuerpo tuviera la capacidad de arder. Una sustancia que contuviera flogisto era potencialmente inflamable. La teoría sostenía que la combustión cesaba cuando todo el flogisto desaparecía. El flogisto no era más que una hipótesis, y así perduró durante un siglo.

En 1772, un farmacéutico sueco llamado Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) descubrió un misterioso gas que ardía con una brillante luz azul. Tenía propiedades sorprendentes. La llama de las velas se reavivaban en su presencia; no solo no era venenoso, sino que cuando alguien lo respiraba durante un rato tenía la sensación de que sus pulmones se liberaban. Incluso era capaz de reanimar a animales que habían estado a punto de morir de asfixia.

Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), considerado por algunos como el padre de la química moderna, bautizó a este elemento con el nombre de oxígeno. Se había encontrado por fin al elemento responsable de los procesos de combustión. Y fue así como, cien años después de las observaciones de Hooke, el nitro aéreo cambió su nombre por el de oxígeno.

CAPÍTULO 2

La «Micrografía»: cuando se empezó a ver lo invisible

Inspirados por la filosofía de Bacon, científicos ingleses y escoceses se unieron para crear una sociedad que primero se llamó Colegio Invisible y que luego dio lugar al nacimiento de la Royal Society. Sus bases eran las que definían los métodos de la Nueva Ciencia, paradigma del pensamiento filosófico del siglo XVII, del que Hooke fue un de los miembros más representativos. Este publicó su obra más emblemática, la *Micrografía*, bajo los auspicios de la Royal Society.

El filósofo, político, abogado y escritor británico Francis Bacon (1561-1626) fue el padre del empirismo y está considerado como uno de los fundadores del pensamiento moderno, siendo un claro exponente del método deductivo, del que hace una clara exposición en una de sus obras más representativas, *Novum organum*. En este sentido, es la figura más representativa del abandono definitivo de la escolástica. Su influencia, en lo que acabará siendo el nacimiento de la Nueva Ciencia, queda de manifiesto en la obra mencionada, ya que en ella asienta las bases de lo que deberá ser el enfoque experimental de la naturaleza, no tanto en el método en sí, como en la actitud mental que debe mantener el observador. Para ello, reclama un escepticismo previo que libere a la mente de cualquier idea preconcebida y la predisponga a percibir la realidad que la rodea mediante lo que denomina una «experiencia sensible». El observador debe ser capaz de recoger los datos necesarios que son el resultado de su experiencia y establecer una teoría a partir de ellos. Esta teoría será tanto más consistente en la medida en que la realización del experimento reúna dos condiciones esenciales, que sea susceptible de ser repetido en otro lugar y por otras personas diferentes, y que pueda ser refutado.

Bacon considera que hay cuatro obstáculos básicos que impiden la aparición de nuevas ideas, obstáculos a los que llamó ídolos y que son la tribu, la caverna, la plaza pública y el teatro. El

primero está formado por todos los prejuicios que son comunes a la especie humana y el segundo es el formado individualmente por las personas, su educación, sus hábitos y sus costumbres. La plaza pública hace referencia a los condicionamientos del lenguaje y, por último, el teatro es la manifestación pública organizada o institucionalizada de un conjunto de ideas preconcebidas.

Luego Bacon establece lo que llama la «teoría de las tres tablas», que son indicaciones más precisas y de carácter construc-

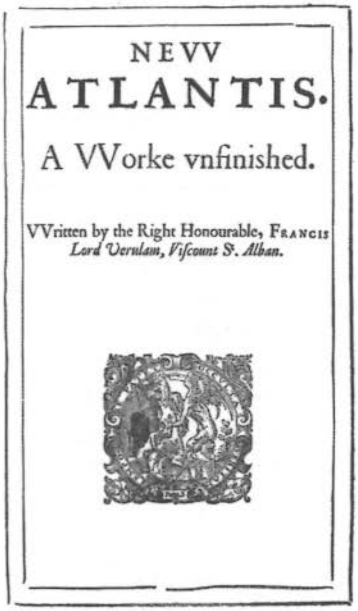
FRANCIS BACON



Retrato de Francis Bacon por John Vanderbank hacia 1731, a partir de un original de hacia 1618 realizado por un artista desconocido.

Sir Francis Bacon nació en Strand, Inglaterra, el 22 de enero de 1561. Hijo de un aristócrata próximo a los círculos de influencia de la corte de Isabel I, fue educado por tutores hasta los trece años, edad a la que ingresó en el Trinity College de Cambridge, donde cursó estudios hasta los dieciséis. Después de un breve período en el Societate Magistrorum fue destinado, junto a su hermano mayor, como agregado a la embajada inglesa en París. Durante esa época adquirió los conocimientos necesarios para ejercer más tarde cargos políticos y diplomáticos que serían la base de su fuente de ingresos. En 1579 regresó a Inglaterra y en 1613 fue nombrado procurador general en la corte de Jacobo I; cinco años más tarde fue nombrado canciller. Gracias a estos cargos políticos logró acumular una considerable fortuna que le permitió retirarse y poder dedicarse al estudio de las ciencias. Bacon fue el primero en incluir la lógica en el método científico. Sus obras más importantes fueron *Novum organum* (1620), que puede ser considerada como una obra fundamental para las nuevas corrientes empíricas, y *Nueva Atlántida* (1626), utopía en la que recrea una sociedad formada por científicos. Existe una curiosa teoría, que surgió a principios del siglo XIX, según la cual la obra de William Shakespeare es en realidad original de Bacon. Francis Bacon falleció en 1626 a causa de una pulmonía.

LA «NUEVA ATLÁNTIDA»



Portada de la *Nueva Atlántida*, edición de 1628.

La *Nueva Atlántida (The New Atlantis)*, de Francis Bacon, apareció publicada en latín en 1626. Su género es de difícil clasificación, y quizá actualmente se podría considerar como una novela de aventuras. En un barco viaja un grupo de cincuenta personas, que naufragan y van a parar a una isla llamada Bensalem, en la que se encuentran con una comunidad que forma una sociedad ideal perfectamente organizada según unas reglas de juego previamente establecidas. Es entonces cuando la obra adquiere el carácter de utopía y como tal también podría ser clasificada. En tanto que utopía, Bacon no se centra tanto en los aspectos sociales de la misma como en los científicos. Todo el sistema económico y social de la isla gira en torno a lo que podríamos llamar «centros de gestión y generación de conocimiento». La información científica es gestionada en un ámbito estrictamente colaborativo. Las fuentes son diversas. Por un lado están los libros de los que se dispone, de los que se extraen datos que se clasifican y se envían a los distintos departamentos según el objeto de la investigación que se desarrolla en cada uno de ellos. También se acude a fuentes de información externas que siguen el mismo circuito. En este apartado no deja de ser curioso cómo plantea lo que se podría considerar como viajes de estudios, diciendo que sus ciudadanos «navegan hacia países extranjeros bajo la bandera de otras naciones (pues nosotros ocultamos la nuestra), trayéndonos libros, resúmenes y modelos de experimentos realizados en todas partes». A estos viajeros los llama los «mercaderes de la luz». En cada uno de los centros de investigación se observan y diseñan nuevos experimentos siguiendo unas pautas concretas de trabajo que están regidas por unas reglas básicas que todos deben seguir, para lo cual son iniciados como acólitos en una secta. En esta obra, Bacon se adelanta a los tiempos de manera notable describiendo inventos como los submarinos, los aviones, los altavoces o técnicas para el cultivo artificial de plantas. Pero sin duda, donde su capacidad de predicción se mostró más asombrosa fue al considerar el conocimiento como posible moneda de cambio.

tivo de lo que será el método científico en sí. Por ejemplo, si se trata de un fenómeno como la producción de calor, la primera tabla estudia los escenarios en los que dicho fenómeno aparece, como la presencia de los rayos solares; en la segunda, aquellos en los que no se da, como los rayos lunares, y por último, en la tercera tabla establece lo que sería un gradiente de la intensidad con que se produce dicho fenómeno.

Por otro lado, también en la primera mitad del siglo XVII la masonería se organizaba como institución reconocida en Inglaterra y Escocia, con un marcado interés en apoyar las ciencias experimentales. No sería demasiado arriesgado afirmar que la conjunción de estos tres elementos, la masonería, la creación de la Royal Society y la influencia del pensamiento de Francis Bacon, íntimamente relacionados entre ellos, formaron el crisol del que nacería la revolución científica del siglo XVII.

«NULLIUS IN VERBA»

Ya en la década de 1650 existía entre los científicos ingleses una clara inquietud y una necesidad de formar grupos independientes de pensamiento. El mismo año en que Boyle se trasladó a Oxford, se formó un grupo de científicos que se denominaron a sí mismos el Oxford Experimental Club. Entre ellos estaban el matemático Seth Ward, el arquitecto y astrónomo Christopher Wren, el médico Thomas Willis, el filósofo John Locke y el mismo Robert Boyle.

A partir de 1640, el centro neurálgico del grupo se localizó en el Gresham College, una institución privada que había sido fundada por sir John Gresham, un mercader consciente de que los avances científicos podían reportar beneficios al comercio, especialmente al marítimo —su sobrino, sir Thomas Gresham, sería guardián general de la masonería inglesa—. El grupo tenía un único objetivo: adquirir conocimiento científico a partir de la práctica experimental. Condiciones: antes de reunirse debían dejar puertas afuera cualquier convicción religiosa, filosófica o política, temas todos ellos que estaban prohibidos en las reuniones de

trabajo. Se trataba de hacer «borrón y cuenta nueva». Así nació el que Robert Boyle denominó el Colegio Invisible, del que ya desde sus inicios también formó parte Robert Hooke.

Era lo que hoy llamaríamos una red social que tenía un curioso sistema de comunicación consistente en hacer anotaciones en los márgenes de los libros. Se reunían semanalmente en una taberna o en el mismo Gresham College, y fue en una de esas reuniones, hasta cierto punto informales, que decidieron organizarse como institución y fundar una sociedad para la promoción del saber experimental físico-matemático. Establecieron que se reunirían una vez por semana, los miércoles. Los miembros pagarían una cuota semanal de un chelín y una de diez chelines de entrada, ya que necesitaban dinero para llevar a cabo sus experimentos. Luego decidieron institucionalizar la sociedad y crearon unos estatutos que presentaron al rey, que los aprobó y apoyó mediante un documento fechado el 15 de julio de 1662. Había nacido oficialmente la Royal Society.

> «Existe un nuevo mundo visible que ya ha sido descubierto.»
>
> — Robert Hooke.

El lema adoptado por la sociedad fue *Nullius in verba* («en palabras de nadie»), con el que una vez más se adscribían al criterio de que cualquier descubrimiento debía basarse en evidencias experimentales, rechazando cualquier criterio o verdad que tratara de ser impuesto por un principio de autoridad.

Los doce miembros fundadores de la Royal Society fueron John Wilkins, William Brouncker, Robert Boyle, Alexander Bruce, sir Robert Moray, sir Paul Neile, Jonathan Goddard, William Petty, William Ball, Laurence Rooke, Christopher Wren y Abraham Hill, y al menos cinco de ellos eran masones.

Se nombró presidente a William Brouncker y a John Wilkins y Henry Oldenburg como secretarios. También se decidió nombrar a un *curator* —Comisario de Experimentos—, cuya tarea consistiría en presentar semanalmente algunos de los experimentos llevados a cabo por los miembros de la sociedad, cargo

LA PRIMERA PUBLICACIÓN DE LA ROYAL SOCIETY

The History of the Royal Society of London puede ser considerado como el primer libro oficial que testimonia la fundación y los primeros pasos de la Royal Society. Fue escrito por John Wilkins y presentado en la Sociedad el 10 de octubre de 1667. Es interesante analizar el grabado que aparece como frontispicio de esta primera edición, realizado por Thomas Sprat y diseñado por John Evelyn. En él puede verse una habitación con tres arcos al fondo en la que en un primer plano hay un busto de Carlos II flanqueado por dos personajes sentados. El tercero que está de pie es un mero figurante, muy propio de la época, que se limita a sostener una corona de laurel sobre la cabeza del monarca. Diversos objetos, entre los que hay un reloj del que hablaremos en un capítulo posterior, dan una clara muestra del escenario masónico en el que el autor quiso enmarcar a la institución, como son el suelo en forma de damero o los diferentes compases que cuelgan sobre las paredes. A la izquierda del busto del rey se encuentra sentado William Brouncker, el que por entonces era presidente de la Royal Society. A la derecha aparece el filósofo Francis Bacon. La presencia tan destacada de Bacon en este grabado documental es del todo significativa y probablemente vaya más allá de lo que se podría considerar como un mero homenaje.



Frontispicio de la primera edición de *The History of the Royal Society*, conservada en la National Portrait Gallery de Londres.

que recayó en Hooke el 5 de noviembre de 1662. Se le asignó una pequeña retribución y también se le permitió utilizar uno de los alojamientos del Gresham College.

La Royal Society le daba la mayor importancia a los experimentos, pero también se la daría a las publicaciones, que sería su ventana al mundo. La primera de ellas, *Sylva, or a Discourse*

of Forest Trees («Sylva, o un discurso sobre árboles forestales»), de carácter científico, está fechada en 1664 y estuvo a cargo de John Evelyn (1620-1706). La segunda le correspondió a Hooke, que en 1665 publicaría en la Sociedad su obra más carismática, la *Micrografía*.

LA «MICROGRAFÍA»

«El libro más ingenioso que jamás he leído en mi vida.» Este fue el dictamen del famoso diarista inglés Samuel Pepys (1633-1703), fiel documentalista de la época, cuando a las dos de la madrugada finalizó la lectura de la *Micrografía* después de haberla leído de una sola sentada. Su lectura le entusiasmó hasta tal punto que se hizo con un buen montón de instrumentos científicos y se convirtió en acérrimo defensor de la Nueva Ciencia. En 1665 se hizo miembro de la Royal Society y en 1684 fue nombrado presidente de la misma. Este es un ejemplo documentado del poder de fascinación que en su momento tuvo esta obra y que alcanzó a varias generaciones. Hasta cierto punto, aún hoy se puede afirmar que no ha perdido del todo su capacidad de fascinación. No en vano, la *Micrografía* está considerada como una de las obras maestras de la ciencia del siglo XVII.

En muchos sentidos, la *Micrografía* se puede considerar como una de las primeras obras de divulgación científica de la historia. Hooke prefirió darle formato de narración antes que de comunicado científico, para que de esta forma pudiera ser abordado por cualquier lector sin necesidad de tener una formación científica previa. Aun así, es importante señalar que para un lector actual, la lectura del original puede resultar engorrosa, ya que Hooke utiliza una prosa condensada y un inglés muy de la época. En la segunda edición que se hizo en 1745 se cambió el estilo, utilizando un lenguaje más resumido y más moderno. Esta nueva edición, que se conoce bajo el título de *Micrographia restaurata*, se llevó a cabo debido a la escasez de ejemplares de que se disponía tan solo cuarenta años después de la muerte de Hooke.

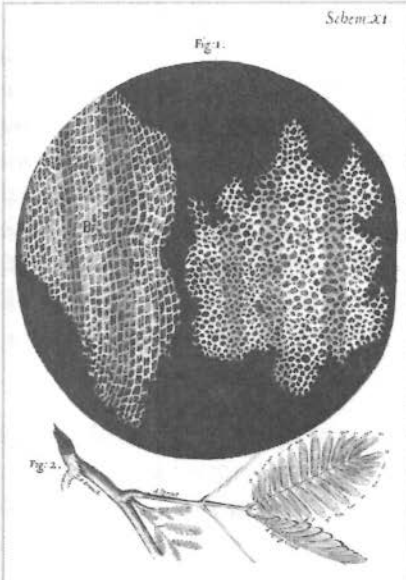
La *Micrografía* fue además uno de los primeros libros que se editaron cuidando con suma exquisitez las ilustraciones que acompañaban al texto, ya que tenían tanto protagonismo como este. Fueron un total de sesenta láminas que contenían diversos grabados salidos de la mano de un artista que dominaba a la perfección la técnica del dibujo, lo que imprimió a la obra una forma de comunicación nunca empleada antes y que, sentando un precedente, sería aplicada posteriormente en muchos textos de comunicación científica.

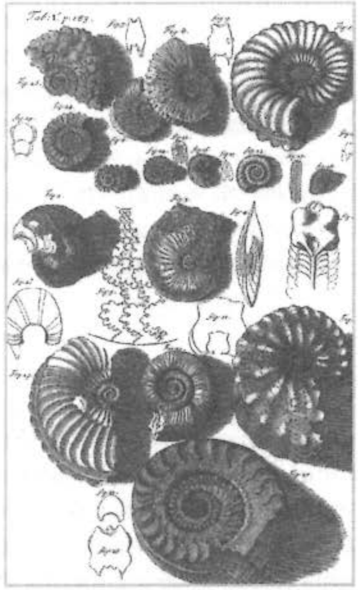
«La gran ventaja de la humanidad sobre las otras criaturas estriba en que no solo podemos contemplar las obras de la naturaleza [...], sino que además poseemos la capacidad de considerarlas, compararlas, alterarlas, complementarlas y mejorarlas para diferentes utilidades.»

— Robert Hooke.

Si Hooke quería interesar e incluso impresionar a los miembros de la corte o a los de la Royal Society, en el microscopio encontró el dispositivo ideal para hacerlo. Era como masticar la galleta mágica de Alicia, hacerse muy pequeño y observar una parte del mundo que les rodeaba y al que hasta entonces nadie había tenido acceso. Hooke se convirtió así en «periodista científico», en un reportero gráfico que en lugar de una cámara utilizaba sus habilidades naturales para el dibujo y la pintura, dejando en la *Micrografía* algunas de las mejores láminas que se han hecho nunca en observaciones naturales con el microscopio.

No es difícil imaginar el impacto que imágenes como la de un piojo agarrado a un pelo (lámina XXXV), en la que el insecto parece tener las dimensiones de un elefante, entraran a formar parte del mundo onírico de los lectores como una pesadilla aterradora, sobre todo si se caía en la cuenta de que aquella sobrecogedora criatura no surgía de la imaginación de una mente calenturienta, sino que se trataba de un insecto que en aquel mismo instante podía estar correteando por su cuero cabelludo.





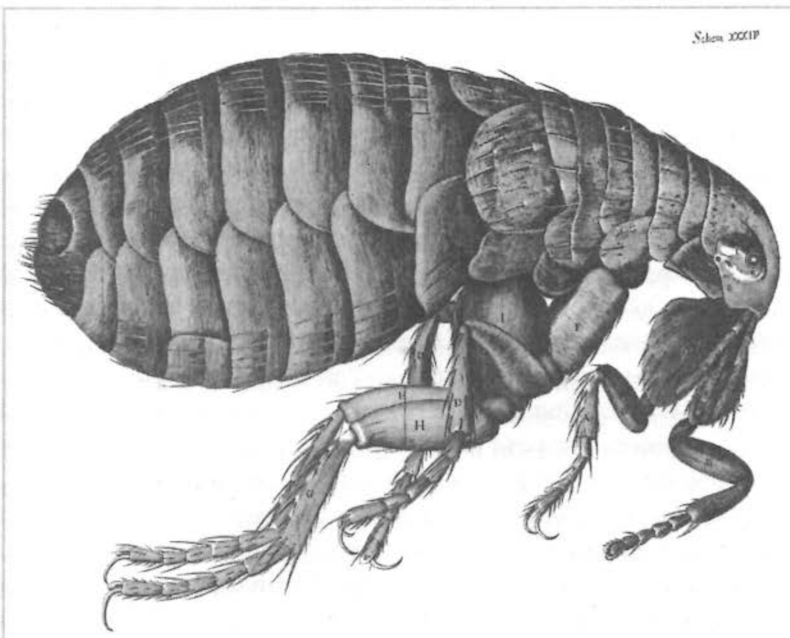


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Hooke observó que el corcho y otros tejidos vegetales están constituidos por pequeñas cavidades separadas por paredes, a las que llamó «células». Lámina extraída de *Micrografía*.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Los estudios de Hooke sobre fósiles microscópicos le llevaron a ser uno de los primeros impulsores de la teoría de la evolución de las especies. En la imagen, ammonites dibujados por Hooke en su *Lectures and discourses of earthquakes and subterraneous eruptions* («Conferencias y discursos sobre terremotos y erupciones subterráneas»), publicado póstumamente en 1705.

FOTO INFERIOR:
Dibujo de una pulga publicado en *Micrografía*.

UN LIBRO POR ENCARGO

Hooke escribió la *Micrografía* cuando tenía veintiocho años y lo hizo por encargo. La Royal Society quería ofrecer al rey Carlos II un regalo de carácter científico que fuera capaz de impresionarle, lo que ayudaría a mantener una buena sintonía entre la Corona y la Royal Society y, entre otras cosas, paliar parte de sus gastos. Hay que tener en cuenta que se trataba de una institución cuyo mantenimiento no era fácil de justificar ante una sociedad que poco o nada entendía de los entresijos del avance científico.

En un principio, la tarea de «encantar» al rey le fue encomendada a Wren, que por su cuenta había hecho y reproducido en dibujos algunas observaciones de insectos realizadas con su primitivo microscopio, pero Wren rechazó el encargo aduciendo que entonces estaba más ocupado e interesado en otras cuestiones muy alejadas de la filosofía natural.

Hooke, por su parte, había estado realizando observaciones con el microscopio desde 1656 y durante los siete años siguientes las había dado a conocer como *curator* en las reuniones semanales de la Sociedad, de manera que la mayoría de sus miembros ya conocían los trabajos de Hooke. A la Sociedad no le quedaban más alternativas y finalmente decidió encomendarle el trabajo a Hooke. De todas formas, se acordó que antes de su publicación debía ser revisado por un experto, lo que suponía una cierta humillación para Hooke, algo a lo que tuvo que acostumbrarse a lo largo de toda su vida. Sir William Brouncker (1620-1684), por entonces presidente de la Royal Society, fue el encargado de la revisión. Es muy probable que cuando leyera el texto se llevara una sorpresa y que se viera en una situación comprometida ante un contenido demasiado novedoso y que superaba su capacidad de crítica. Hooke había convertido muchas de sus observaciones en el punto de partida de una nueva investigación. Finalmente, Brouncker decidió autorizar la publicación siempre y cuando Hooke expresara de manera clara que las ideas contenidas en la obra eran fruto de su propia cosecha y que en ningún momento serían respaldadas por la Sociedad.

Aunque el libro tiene como protagonista al mundo microscópico —Hooke eligió intencionadamente el título, *Micrographia*, un término latino que se refiere a la descripción de las partes y propiedades de los objetos que no se pueden ver sin la ayuda del microscopio—, trata disciplinas diversas, algunas fuera del ámbito de la microscopía, como temas de astronomía o de estática. Esta iba a ser la primera publicación importante de Hooke auspiciada por la Royal Society y sabía que era una oportunidad que debía aprovechar.

HOOKE RESCATA EL MICROSCOPIO

Muchos creen que Hooke es el inventor del microscopio, y nada más lejos de la realidad. El invento se atribuye al neerlandés Zacharias Janssen (1588-1638), quien lo dio a conocer en 1590. Tampoco fue Hooke el primero en llevar a cabo observaciones detalladas con el mismo. Hay un antecedente importante en el anatomista y biólogo italiano Marcello Malpighi (1628-1694), considerado el padre de la histología, quien con su descubrimiento de los vasos capilares en los pulmones de una rana conseguiría rescatar la teoría de la circulación sanguínea que William Harvey había propuesto en 1630.

Lo que sí hizo Hooke fueron dos cosas. La primera, perfeccionar notablemente el instrumento; y la segunda, tanto o más importante que esta, rescatar al microscopio del olvido.

El telescopio y el microscopio son los dos dispositivos ópticos que, como extensión artificial de nuestro sistema visual, nos han permitido conocer parcelas del mundo que nos rodea que de otra manera nos hubieran quedado vedadas. Pero históricamente, en lo que a la experimentación científica se refiere, el telescopio siempre fue el hermano mayor, y no solo por su fecha de nacimiento. La necesidad de proyectarse hacia el espacio exterior se remonta a las primeras inquietudes que tuvo el ser humano por hacerse una idea cabal del mundo en el que vive. No es que ignorara la existencia de lo más pequeño; ya había observado partícu-

las de polvo e insectos minúsculos que podían apreciarse a simple vista. Incluso se había especulado con la posibilidad de que la materia estuviera formada por átomos, elementos indivisibles de tamaños inimaginablemente pequeños. Pero esto era algo que no pasaba de ser una mera consideración filosófica.

«Por más que la diferencia entre una planta y un animal sea muy grande, no he podido encontrar hasta ahora un argumento convincente que me obligue a afirmar que ambos son completamente heterogéneos, poseyendo naturalezas de tipo totalmente distinto.»

— Robert Hooke.

Cuando Hooke escribió la *Micrografía*, hizo una llamada de atención, nos puso en aviso de que existen seres vivos que nos rodean y que no podemos percibir, que los materiales que habitualmente utilizamos tienen estructuras insospechadas de las que podemos aprender muchas cosas; que, en definitiva, el mundo de lo pequeño puede ser tan grande como el más grande de los mundos.

Al hacer esto, Hooke fue fiel a sus propósitos, a uno de los objetivos fundamentales de su investigación científica, como es la observación de la naturaleza a través del experimento. Para ello, reivindicó el enorme valor que tiene la utilización del instrumental adecuado. Así, no es de extrañar que lo primero que aparece en la *Micrografía* sea una descripción del microscopio que Hooke utilizó para llevar a cabo sus observaciones.

EL MICROSCOPIO COMPUESTO

La manera más simple que hay para ampliar una imagen es la utilización de una lupa, lo que se entiende por microscopio simple, en el que una o más lentes convergentes son utilizadas en un solo sistema óptico. Los primeros microscopios compuestos empezaron a utilizarse a principios del siglo XVII, y a diferencia de los primeros, en ellos se utilizaban dos juegos de lentes que formaban el ocular

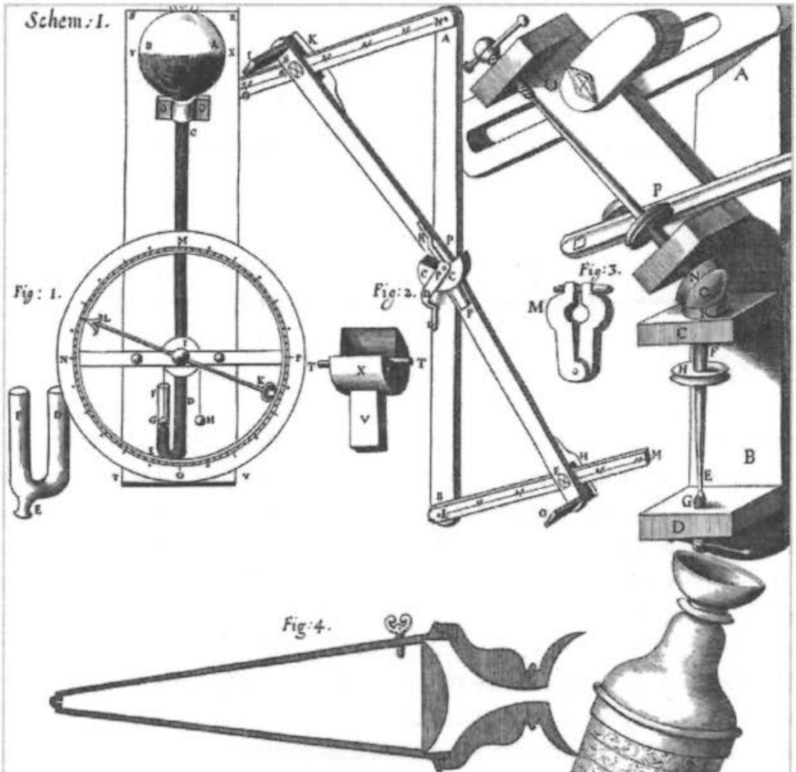
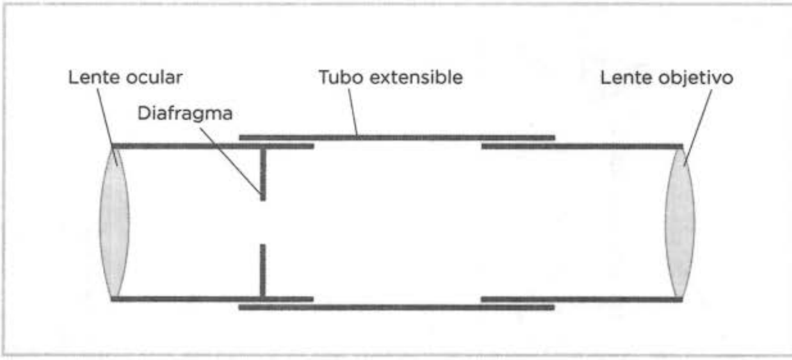


FOTO SUPERIOR DERECHA:

Primera lámina de la *Micrografía*, en la que Hooke detalla los elementos del microscopio que utilizó en sus experimentos y los utensilios que empleó para conseguir que los dibujos guardaran las proporciones originales.

Esquema de un microscopio compuesto.



y el objetivo (véase la figura). Estos instrumentos eran de manufactura muy simple, ya que bastaba con un simple tubo, que podía ser de cartón, como el empleado por Hooke, y un par de lentes biconvexas. La mayor dificultad estaba en el tallado de las lentes.

En el prefacio de la *Micrografía*, Hooke hace una descripción muy detallada del microscopio que utilizó y que viene representado en la primera de sus láminas. También describe cómo realizaba los dibujos a escala, a base de colocar una regla graduada sobre la mesa y mirar con un ojo la imagen del ocular, mientras que con el otro hacía los dibujos procurando ajustarse a la escala de manera que en todo momento se guardaran las proporciones originales.

ESTRUCTURA DE LA «MICROGRAFÍA»

El libro está distribuido en observaciones que hacen las funciones de capítulos y organizado de manera que la dificultad de los temas aparece en orden creciente.

Como ya se ha comentado, la *Micrografía* fue el primer libro que Hooke publicó bajo los auspicios de la Royal Society, una oportunidad que aprovechó para mostrar gran parte de su trabajo como científico. Y lo hizo dándole una estructura singular en la que trató de preservar el objetivo que le había sido encomendado, el de despertar el interés del lector. El resultado final es una obra en la que

pueden observarse la presencia de diferentes capas, concretamente tres, que se corresponden con la profundidad de su pensamiento.

En primer lugar, y como protagonistas, están las observaciones microscópicas como tales, estructuradas en orden de dificultad, que ascienden paulatinamente partiendo de objetos cotidianos inanimados, estructuras cristalinas, vegetales y del reino animal, completadas con tres observaciones finales, que nada tienen que ver con los temas anteriores y que forman como un anexo dedicado a temas de astronomía.

Siempre manteniendo la estructura del relato, en un segundo nivel Hooke aprovecha para exponer teorías científicas que van más allá de la función meramente descriptiva que plantean las observaciones. Aquí es fiel a los cánones de la Nueva Ciencia, ya que sigue el procedimiento de prolongar el alcance de nuestros sentidos mediante los dispositivos necesarios. Para ello explica cómo deben construirse y cómo deben ser utilizados de la forma correcta. Luego experimenta de manera objetiva, se dedica a «someter la naturaleza a tortura» —como le gustaba decir—, limitándose a obtener datos sin juicios previos, para por fin intentar dar una explicación mecanicista de todo aquello que había ido observando. En este segundo nivel encontramos algunas conjeturas y también algunos resultados de carácter científico, como los fenómenos de capilaridad, el estudio de la combustión o la naturaleza de los gases, por poner algunos ejemplos.

El tercer nivel, sin duda el más profundo, se corresponde con lo que actualmente llamaríamos una visión unificadora de la ciencia y reviste una gran importancia, no solo en el pensamiento científico de Hooke, sino en toda la historia de la física hasta comienzos del siglo XX, y es la teoría del «éter».

LA TEORÍA DEL ÉTER EN HOOKE

Aristóteles fue el primero en especular con la existencia del éter, al que consideró como la sustancia más fina que se podía concebir en el espacio que conformaba nuestra realidad. Probablemente, esto era debido a la necesidad de que esta sustancia debía

llenar todo el espacio y para ello debía ser capaz de colarse entre los más finos intersticios que la materia pudiera albergar. En su visión del mundo, todo lo que había existido, existiera o pudiera existir estaba formado por la combinación básica de los cuatro elementos, aire, agua, fuego y tierra. Si el éter era una sustancia mucho más fina y sutil que estas cuatro debía tener entidad propia, como generadora de todo lo existente y, en cierta forma, estar muy por encima de ellas. Y así fue como nació la «quintaesencia» o el «quinto elemento», que eran otros de los nombres con los que se conocía al éter en la Antigüedad.

El éter permitió a los físicos dotar al espacio de un medio a través del cual pudieran transmitirse la luz o cualquiera de las fuerzas que eran ejercidas a distancia, como la de la gravedad o el magnetismo. Era incluso capaz de explicar el origen de esas mismas fuerzas y de las masas entre las que interactuaban.

Hooke fue heredero directo de las teorías del éter sustentadas por Descartes, en las que la estructura última estaba formada por una especie de vórtices que, a modo de espirales en movimiento, daban lugar a una serie de fenómenos físicos observables. Pero Hooke no se adscribió a este modelo y fundamentó la estructura del éter en movimientos vibratorios. Estas vibraciones, originadas en diferentes puntos del espacio, generaban ondas esféricas que se propagaban con una velocidad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al centro de la esfera. Para Hooke, la materia no era asunto de extensión, sino de movimiento: un conjunto de partículas permanecen agrupadas en la medida en que son capaces de resonar armónicamente. Partículas de un elemento diferente serán atraídas por otro en función de esa frecuencia de vibración, capaz de crear pulsos de atracción entre las masas.

Es interesante destacar que con este esquema, Hooke consiguió dar una explicación coherente a cuestiones que todavía hoy son muy espinosas, como puede ser la naturaleza de las fuerzas gravitatorias. Gracias a este esquema, Hooke podía explicar también las teorías de la elasticidad, haciéndola extensiva a los gases. Un gas contenido en un recipiente tiene a sus partículas vibrando con una determinada frecuencia y a una determinada velocidad. Cuando se reduce el volumen del recipiente que contiene el gas,

esta frecuencia aumenta y las partículas se mueven más deprisa en un espacio menor, con lo que aumenta la presión del gas. Se trataba de toda una anticipación de lo que acabaría siendo la teoría cinética de los gases.

Una primera lectura de la *Micrografía* en la que no se tenga en cuenta la teoría del éter puede resultar desconcertante cuando no confusa, como sucede, por ejemplo, en la observación VI sobre las cañas de vidrio, en la que utiliza el término «congruencia» para referirse al acoplamiento de partículas según sus frecuencias de vibración:

> Todo lo cual parecerá no poco extraño a quien considere que un cuerpo fluido es solo aquel cuyas partes se hallan en movimiento regular y confuso, sin incluir también la incongruencia con algunos otros cuerpos. Así pues, aparte de la incongruencia con el fluido ambiente, hemos de considerar también la congruencia mutua de las partes del fluido contenido. (*Micrografía*. Observación VI, pág. 47.)

Desgraciadamente, Hooke carecía del aparato matemático necesario para que esta teoría se consolidara como tal.

OBSERVACIONES

El inicio de observación I, de la punta de una agujita aguda, es una declaración de principios y de intenciones. De principios, porque nos sitúa ante el origen de todas las cosas. Para ello, Hooke recurre a un concepto matemático diciendo que el punto es el fundamento y origen de toda la geometría. Refiriéndose luego a la naturaleza, menciona los cuerpos *incompuestos*. De intenciones, porque propone que debemos partir de lo más simple para tratar de comprender lo complejo, con lo que anuncia la manera en que va a plantear el recorrido por todas las observaciones. De otra forma, afirma, «no sea que, al distinguir y estimar nuestro camino, perdamos rápidamente tanto la naturaleza como nuestra guía, así como a nosotros mismos...».

Muestra entonces cómo hasta la aguja más fina tiene punta roma. Se refiere a agujas hechas por el hombre y las compara con pelos o aguijones de algunos insectos que son en este sentido mucho más perfectos. Aun así, dice que si se dispusiera de aparatos capaces de ampliar infinitamente más estas imágenes, volveríamos a encontrar de nuevo imperfecciones, llegando a una reflexión, cuanto menos curiosa, al afirmar que «la magnitud o extensión de cualquier cuerpo puede dividirse al infinito, aunque la materia quizá no». Es como si aludiera a una especie de estructura fractal a la vez que mantiene una indivisibilidad cuando se refiere a la estructura última de la materia, algo que en ningún caso podría llegar a visualizarse mediante ningún tipo de instrumento, por muy sofisticado que fuera.

Cuando observa un punto, ya sea hecho por una pluma o por un tipo de imprenta, se da cuenta de que ocupa un espacio considerable, suficientemente grande como para ser utilizado para escribir un texto en su interior. Sugiere que esta sería una buena forma de enviar mensajes secretos. Y buena razón tenía, ya que este fue uno de los métodos más utilizados en la Segunda Guerra Mundial, el llamado *micropunto*, en el que, mediante técnicas fotográficas, se incluían párrafos enteros en puntos de diámetros menores de un milímetro. Obviamente, Hooke carecía de técnicas fotográficas para ello, pero al parecer tenía algún método en mente cuando dijo:

> [...] y creo que yo sé de uno, aunque todavía no lo he probado, con el que se podría escribir muchísimo con gran comodidad y con suficiente precisión en un espacio diminuto.

En la observación II, Hooke pasa de la punta de una aguja al filo de una navaja. Aquí vuelve a emplear el símil geométrico para pasar del punto a la recta y nos hace ver que lo que parece un borde perfecto son valles y montañas. Aprovecha para dejar caer que es muy probable que los líquidos también estén formados por partículas, como los granos forman las arenas. No es una observación gratuita, ya que a la larga Hooke se proponía explicar todos los fenómenos, incluido el calor, de manera mecanicista, como

agitación de partículas elementales que están de alguna manera suspendidas en el éter.

Las observaciones III, IV y V están dedicadas a diferentes muestras de tela, como el tafetán, la estopa, la seda o el lino. Sigue siendo una exposición muy atractiva para quien nunca ha tenido la posibilidad de ver imágenes como estas, pero tampoco aquí Hooke se limita a ejercer una función meramente descriptiva, sino que se dedica a analizar las estructuras y a buscar una explicación de la manera en que los tratamientos que se hacen de los diferentes tejidos afectan a las fibras de estos, algo que a la larga —creía Hooke— podría llegar a ser de gran utilidad para la industria manufacturera. Al final de la observación III, vuelve a utilizar al concepto de «congruencia» para referirse a la mayor o menor consistencia de algunos elementos.

En la observación IV, cuando analiza la seda, se plantea la siguiente posibilidad:

> [...] se podría descubrir un procedimiento para fabricar un compuesto glutinoso artificial muy semejante, cuando no igualmente bueno o incluso mejor que ese excremento o cualquier otra sustancia que sea con la que el gusano de seda hila su capullo. Si se hallase tal compuesto, no cabe duda de que sería cosa fácil encontrar rápidamente métodos de tirarla en forma de alambre para su uso.

Hooke estaba imaginando la fabricación de seda artificial y proponiendo a otros que lo hicieran, que iniciaran una vía de experimentación para la que él acababa de abrir una puerta. Seguro que su mente archivó un proyecto más al que probablemente no se podría dedicar, pero en el que, como en tantos otros, vislumbró un camino a seguir.

Al principio de la observación V, Hooke advierte:

> Solo hay muy pocas cosas artificiales que merezca la pena observar al microscopio, por lo que me referiré brevemente a ellas.

Considera que estas cosas han sido diseñadas con fines que pueden ser percibidos a simple vista y que no vale mucho la pena

entretenerse en ver sus deformidades a través del microscopio. Es como si anunciara el final de una primera parte que ha sido, hasta cierto punto, más divertida que interesante.

«[...] tal vez seamos capaces de discernir todas las operaciones secretas de la naturaleza, casi de la manera que lo hacemos con aquellas que produce el arte [...].»

— Robert Hooke.

Y así es, ya que en la observación VI, de las pequeñas cañas de vidrio, establece los principios físicos de la capilaridad —cuanto más estrecho es un tubo, más asciende un líquido contenido en él— y las bases para la construcción del barómetro. El resto de la observación VI y la siguiente, dedicada a las gotas de vidrio, lo centra en el proceso de globulización, según la teoría del éter, es decir, de las vibraciones capaces de generar congruencias o incongruencias y que va de la simple formación de gotas de vidrio hasta la formación de planetas. Estos mismos principios son los que aplica al estudio de las observaciones VII, VIII, IX y X, que versan sobre el fuego, la luz y los colores.

Las observaciones XI a XV están dedicadas a elementos naturales como la arena o los cristales de hielo que presentan una cierta ordenación en estructuras cristalinas, que Hooke, fiel a su teoría del éter, explica como resultado de vibraciones en el interior de fluidos.

En las observaciones XVI, XVII y XVIII se adentra paulatinamente en el reino vegetal. La última de ellas es una de las más populares: «De la estructura o textura del corcho y de las celdas y poros de algunos otros cuerpos esponjosos semejantes». Se sabía que el corcho era un material muy liviano que flotaba en el agua, aunque nadie sabía la razón. Hooke cortó láminas muy finas y pudo observar la presencia de pequeñas cavidades que contenían aire y que eran lo que hacía que este material flotara en el agua. Su forma geométrica y su disposición le recordó a las celdas de un monasterio, por lo que bautizó con el nombre de «células» a estas pequeñas cavidades, nombre que ha permanecido hasta nuestros

días para designar seres microscópicos encerrados en algún tipo de membrana.

A continuación aparece la serie más larga de todas, que está dedicada a los vegetales y que incluye las observaciones XIX a XXXI. En ellas es interesante destacar la posición mecanicista que adopta Hooke para explicar los procesos evolutivos que permiten obtener estructuras complejas a partir de otras más sencillas.

En las observaciones XXXII a LVII se sumerge ya de lleno en el mundo animal, aunque lo hace también de forma paulatina, empezando por pelos y acabando con algunos insectos como moscas y mosquitos. Entre ellas se encuentran dos de sus láminas más célebres, de una gran calidad artística, y que mayor impacto causaron en su momento, la de los ojos y cabeza de una «mosca zángano» (observación XXXIX) y la de un piojo (XXXV) en la que puede verse a uno de estos insectos agarrado a un pelo humano.

Las tres últimas observaciones, que no tienen ninguna relación con las anteriores, están dedicadas a temas de astronomía y en ellas, sin ninguna solución de continuidad aparente, cambia el microscopio por el telescopio. Dichas observaciones se comentarán con detalle en el capítulo 4.

CAPÍTULO 3

La ley de Hooke y la medida del tiempo

La ley de Hooke se estudia por primera vez en la enseñanza secundaria y suele quedar para siempre asociada a la imagen de un muelle del que cuelga un peso. Originalmente, Hooke la descubrió investigando las posibles mejoras que podían ser introducidas en los mecanismos de un reloj de péndulo, utilizando para ello la fuerza recuperadora de un resorte espiral comprimido. Sin embargo, la aplicación de la ley de Hooke abarca a un amplio rango de objetos que tienen la propiedad de la elasticidad.

La ley de Hooke, relativa a la fuerza recuperadora de los resortes, es una ley de enunciado y contenidos sencillos, pero cuyas consecuencias abarcan un amplio espectro de aplicaciones posibles, que van desde la resistencia de materiales hasta dispositivos basados en movimientos armónicos simples. Se trata de una ley que queda enmarcada dentro de una parte de la mecánica general que se conoce como estática. La estática estudia los sólidos en equilibrio, es decir, aquellos en los que la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre ellos es nula, de manera que la posición del sólido no varía con el transcurso del tiempo.

En el caso de la ley de Hooke el esquema es muy simple, ya que se consideran únicamente dos fuerzas en la misma dirección y de sentido contrario.

Supongamos que tenemos un muelle de resorte en posición vertical, anclado en el techo y con un gancho del que podemos colgar diferentes pesos y que la longitud original del muelle es x. A continuación, colgamos un peso P y observamos que la longitud pasa ahora a ser x', de manera que se habrá incrementado una cantidad $\Delta x = x' - x$ (figura 1, en la página siguiente).

Lo normal es que cuando colguemos el peso, el muelle empiece a oscilar. Esperamos a que quede en reposo y consideramos las fuerzas que intervienen entonces. Por un lado, tendremos la fuerza P que la gravedad ejerce sobre el peso, y por otro la fuerza

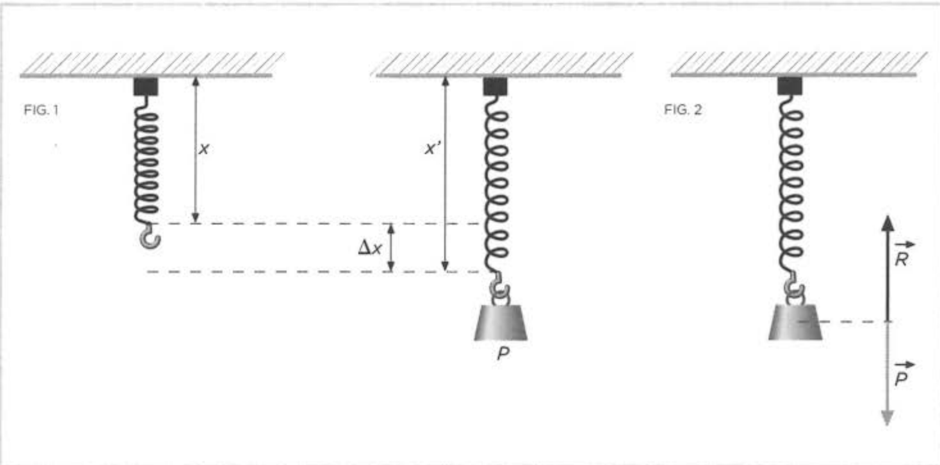


FIGURA 1: **Cuando sometemos un muelle a la acción de un peso, su longitud se ve incrementada en una cierta cantidad.**

FIGURA 2: **Cuando un muelle se encuentra en equilibrio, el peso *P* y la fuerza recuperadora *R* son iguales y de sentido contrario.**

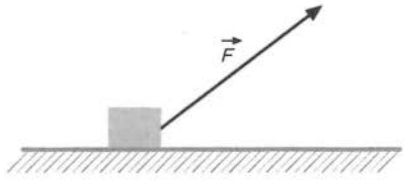
R que ejerce el muelle tratando de recuperar su posición original y que, por este motivo, recibe el nombre de *fuerza recuperadora* (figura 2). Dado que el sistema se encuentra en equilibrio podemos afirmar que ambas fuerzas son iguales: $R = P$.

Lo que ahora nos interesa observar es la relación que existe entre el peso y el incremento de longitud del muelle, para lo cual hay que suspender diferentes pesos y medir la longitud del muelle para cada uno de ellos.

Para simplificar, supongamos que hacemos tres mediciones que nos llevan a establecer la siguiente tabla de valores. Existen diferentes sistemas de unidades para medir tanto la longitud (metros, decímetros, centímetros...) como la fuerza (dinas, newtons, kilopondios), pero aquí consideramos medidas abstractas, también para una mayor simplificación.

F	Δx
1	2
2	4
3	6

VECTORES



La dirección y el sentido de un vector es determinante. En la figura, la fuerza *F* tendería a levantar el cuerpo del suelo, cosa que, con la misma fuerza, no sucedería si la dirección de esta fuera paralela a la superficie.

Tanto en estática como en dinámica, se considera a las fuerzas como vectores, lo que no solo facilita su comprensión, sino que además permite introducir conceptos matemáticos. Un vector es una magnitud que está definida por tres parámetros: magnitud, dirección y sentido. La magnitud es lo que se denomina una cantidad escalar y que suele hacer referencia a algún tipo de medida, de cantidad. En el caso de una fuerza, la magnitud sería un número que mediría, en algún sistema de medidas concreto, la magnitud de dicha fuerza, por ejemplo 25 kilopondios. La dirección indica una orientación espacial; por ejemplo, podemos decir que la acción de la fuerza tiene lugar en dirección vertical. El tercer parámetro, el sentido, nos indicaría si la fuerza es ejercida hacia arriba o hacia abajo, en el caso de que la dirección sea vertical. Aplicando estas definiciones al tráfico, no debería decirse que en una calle hay una señal de dirección prohibida, porque es tanto como decir que no se puede circular por ella. Lo correcto sería decir que es de sentido único, estando el otro sentido prohibido. Los vectores se representan mediante una flecha. El largo de la flecha es el módulo, la dirección del vector es la de la recta que lo contiene o cualquiera de sus paralelas, e indica la dirección, y la punta de la flecha el sentido hacia el que está dirigido el vector.

Observamos que entre las dos magnitudes —fuerza y longitud— existe lo que se llama una *relación lineal*, que en este caso es del tipo:

$$F = 2\,\Delta x.$$

Esto nos permite predecir, dentro de ciertos límites, cuál va a ser la longitud del muelle si colgamos un peso cualquiera. Este es uno de los objetivos fundamentales de la física y, en general, de la mayoría de las ciencias, el poder de predicción.

Si ahora cambiamos el muelle por otro completamente diferente, construido con otro material, y repetimos el experimento, llegaremos a una ecuación lineal similar a la anterior en la que figurará un nuevo parámetro. Por ejemplo, puede suceder que con el nuevo muelle la ecuación sea $F = 3{,}5\ \Delta x$. Repitiendo el experimento con diferentes pesos y diferentes muelles, llegaremos a la conclusión de que la relación existente entre la fuerza y la longitud del muelle viene dada por una ecuación lineal del tipo

$$F = k\ \Delta x,$$

donde k es una constante que recibe el nombre de «constante de rigidez» o también «constante recuperadora» y que depende de la naturaleza del muelle y de su forma geométrica. Esta relación

LOS JUGUETES DE CUERDA



Dos autómatas construidos entre 1768 y 1774 por Pierre Jaquet-Droz, conservados en el Museo de Arte e Historia de Neuchatel, Suiza.

El muelle de resorte fue un dispositivo determinante a la hora de fabricar relojes portátiles. Se inició una época en la que la expresión «dar cuerda» fue de uso común, a pesar de que arrastraba un anacronismo al referirse todavía a la cuerda de la que colgaba un peso y que servía para accionar el mecanismo del reloj. Pero hubo una industria que fue a la zaga de la fabricación de relojes, la de los juguetes. A partir del siglo XVII se despertó una auténtica pasión por los juguetes que eran accionados por un mecanismo de resorte, especialmente el de los autómatas, un juguete caro que hacía las delicias en los ambientes cortesanos, que se vieron inundados de muñecos que andaban, escribían o tocaban un instrumento. Los juguetes de cuerda pervivieron hasta la década de 1960, cuando hicieron su aparición las pilas alcalinas y los motores de resorte quedaron arrinconados, olvidados o formando parte de las vitrinas de los museos.

la podemos expresar diciendo: «La fuerza que devuelve un resorte a su posición de equilibrio es proporcional al valor de la distancia que se desplaza de esa posición», que es precisamente el enunciado de la ley de Hooke, en general, aplicable a materiales elásticos.

Hemos planteado los experimentos a base de estirar diferentes muelles, pero también podríamos haberlo hecho comprimiéndolos. Cuando aplicamos una fuerza de compresión, el muelle reduce su longitud. En cualquiera de los dos casos, la fuerza recuperadora del muelle se opone a la fuerza que causa la deformación, y este es el motivo por el que la ley de Hooke se expresa mediante un signo menos:

$$F = -k\,\Delta x.$$

PROPIEDADES ELÁSTICAS

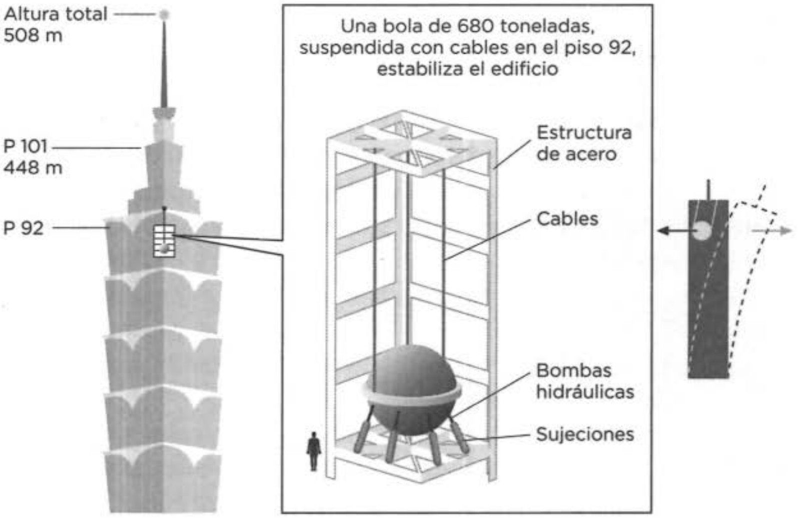
Se dice que un objeto es elástico o que posee la propiedad de elasticidad cuando es capaz de deformarse bajo la acción de una fuerza y de recuperar su forma original cuando deja de estar bajo la acción de dicha fuerza. De manera espontánea, asociamos los objetos elásticos a gomas que se estiran con facilidad y que rápidamente recuperan su forma original cuando las volvemos a dejar sobre la mesa. Sin embargo, el concepto de elasticidad es extensible a una gama muy amplia de materiales, como pueden ser el acero o el hormigón.

Se entiende que las propiedades elásticas se mantienen, para cada material, dentro de ciertos límites, fuera de los cuales el objeto en cuestión puede no recuperar ya la forma original o incluso puede quedar destruido —sobrepasado su límite de elasticidad, una vara de madera llega a partirse con la misma facilidad que puede hacerlo un bloque de cemento—.

En la experiencia planteada para exponer la ley de Hooke, llega un momento en que el peso que suspendemos del muelle es tan grande que este ya no recupera la longitud original. El punto en el que eso sucede se denomina *límite elástico* y es aquel en el que la gráfica que relaciona la fuerza con la deformación deja de ser lineal.

ESTRUCTURAS ELÁSTICAS

Cuando se habla de elasticidad se piensa en resortes, gomas o finas láminas de metal que se doblan con la misma facilidad con que recuperan su estado original. Sin embargo, la elasticidad es un fenómeno que tiene lugar en grandes vigas de acero, en bloques de hormigón y hasta en estructuras arquitectónicas de grandes dimensiones, como puentes o edificios. Una buena prueba de ello son los grandes rascacielos que se construyen en países que, como Japón, se pueden ver fácilmente sometidos a los efectos devastadores de los terremotos. Los ingenieros y arquitectos japoneses han llegado a desarrollar técnicas realmente asombrosas gracias a las cuales enormes edificios son capaces de oscilar, como lo haría una caña de bambú, frente a las sacudidas de un seísmo.

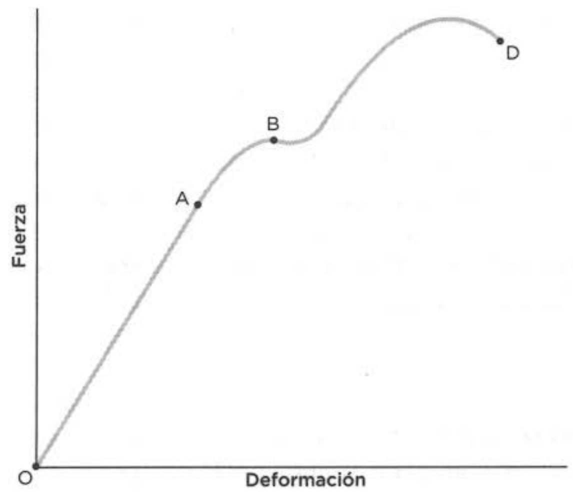


El edificio Taipei 101, en Taiwán, con su bola dorada de acero de 680 toneladas, es capaz de contrarrestar terremotos de hasta nivel 7 en la escala de Richter y vientos de hasta 450 km/h. Al moverse el edificio en una dirección, la inmensa bola de metal se mece en la otra dirección, absorbiendo la energía y limitando el movimiento de la estructura.

Como se observa en la figura 3, el único tramo recto OA de dicha gráfica es aquel en el que la relación entre la deformación y la fuerza es lineal y viene representada por una recta cuya pen-

diente es k, la constante recuperadora que aparece en la ley de Hooke. De hecho, es el único tramo de la gráfica en el que la ley tiene validez. En el siguiente tramo, que va de A a B, la proporcionalidad no es lineal, pero en el momento en que se deja de ejercer la fuerza, el material todavía es capaz de recuperar su forma original. Toda la zona que ocupa el recorrido desde A hasta B es en la que el comportamiento del material es todavía elástico. A partir de este punto, la deformación tiene lugar mucho más rápidamente y el material ya no es capaz de recuperar la forma original. Es la típica situación en la que estiramos tanto un muelle que cuando lo dejamos ir, la longitud con la que queda es mayor que la que tenía originalmente. Es el momento en el que las fuerzas internas se ven superadas y se pierde la estructura molecular original sin vuelta atrás. Se dice entonces que se ha producido una *deformación permanente*. Si se sigue aumentando el valor de la fuerza se llega a un punto D, la *deformación plástica*, en el que el material se rompe definitivamente, las moléculas se han separado y ya no hay vuelta atrás. Aquellos metales en los que el recorrido que va de B a D es largo, se dice que son *dúctiles*, al contrario de lo que ocurre con los *quebradizos*, en los que este recorrido es mucho más corto.

FIG. 3



Gráfica en la que puede observarse la relación que existe, para un determinado material, entre la fuerza ejercida sobre él y la deformación producida.

«DE POTENTIA RESTITUTIVA»

Todos estos resultados que Hooke obtuvo experimentalmente los publicó en 1679 formando parte de un conjunto de seis conferencias con el nombre de *Lectiones cutlerianae (Conferencias cutlerianas)*. La relativa a la elasticidad era la sexta y tenía por título *De potentia restitutiva, o sobre los resortes que explican el poder de los cuerpos elásticos*. En ella, Hooke dice:

> A pesar de que han sido varios los matemáticos actuales de prestigio que han estudiado la teoría de los resortes, ninguno la ha publicado hasta ahora. Hace unos dieciocho años que la descubrí por primera vez; pero, teniendo intención de aplicarla para algún uso particular, me abstuve de publicarla. Hace unos tres años Su Majestad se dignó asistir al experimento realizado en White Hall de donde salió esta teoría, y también mi reloj de cuerda. Hace alrededor de dos años, al final de mi libro acerca de las descripciones de los helioscopios imprimí esta teoría en el anagrama siguiente:
>
> c e i i i n o s s s t t u u,
>
> que quiere decir *ut tensio sic uis* [«como la tensión así es la fuerza»], o sea, que la potencia de todo resorte es proporcional a la tensión del mismo...

Esta no fue ni la primera ni la última vez que Hooke utilizaría un anagrama para expresar un resultado científico, algo que, en general, merece un estudio aparte, pero que en este caso concreto es muy probable que Hooke intentara preservar la autoría del descubrimiento para obtener una patente. También es interesante señalar que al final del párrafo, Hooke hace mención a la aplicación de esta misma ley a la compresión y dilatación del aire:

> Hace unos diez años que publiqué en mi *Micrografía* la forma de llevar a cabo el mismo experimento con una masa de aire, así por rarefacción como por compresión de la misma; por esto no es necesario que añada ninguna otra descripción del mismo.

Este comentario pone una vez más de manifiesto la forma multidisciplinar en que trabajaba la mente de Hooke, alternando los conceptos de elasticidad de materiales, que más adelante aplicaría a las técnicas de construcción arquitectónicas, con la posibilidad de construir un reloj de resorte y, por si no fuera suficiente, aplicar la misma ley a la elasticidad de los gases, aplicación esta última que conduciría directamente al establecimiento de la ley de los gases de Boyle.

> «A menudo dejamos que se nos escapen muchas cosas que merecerían que las retuviésemos, mientras que de aquellas que atesoramos, una gran parte son frívolas o falsas.»
>
> — Robert Hooke.

Las investigaciones que Hooke llevó a cabo en torno a los resortes tenían un objetivo práctico más allá del marco teórico y desembocaron en un dispositivo que acabaría teniendo una enorme influencia, no solo en el ámbito científico, sino incluso en la vida cotidiana de las personas. En las figuras que encabezan el *De potentia restitutiva*, junto a una serie de gráficas, aparecen dos tipos de resortes de los que penden sendos platillos, en los que se deben depositar diferentes pesos que le permitirían establecer una tabla de valores para determinar la relación entre la fuerza aplicada y el alargamiento de los diferentes resortes. Lo que cabe resaltar de esa lámina es el primero de los resortes, que se corresponde con la figura 2 de la lámina mostrada en la página 77. Se trata de un muelle con un arrollamiento plano que es el dispositivo clave para la fabricación de relojes de cuerda, «balanza filosófica sin pesos», como la denominó Hooke. Esta fue, como se ha expuesto antes, una de las aportaciones tecnológicas importantes de Hooke y que habría de tener una especial relevancia en la solución de uno de los mayores problemas que por entonces tenía planteada la navegación, que era la determinación de la longitud. Pero para comprender el alcance de esta innovación hay que comprender primero la relación entre la ley de Hooke y la medida del tiempo.

MOVIMIENTOS PERIÓDICOS

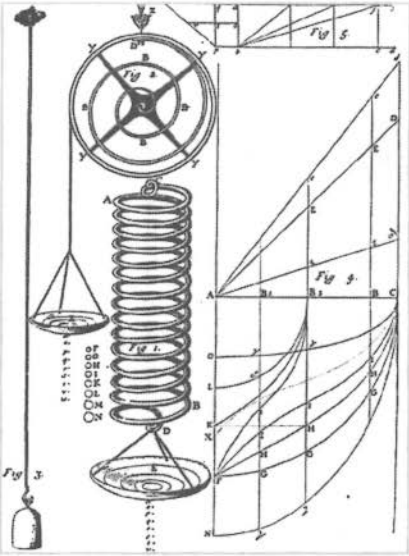
Cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza, el movimiento resultante puede ser muy diferente según la dirección, el sentido o la magnitud de la fuerza. También el resultado puede ser muy distinto dependiendo de que la fuerza sea constante o no. Entre todos estos tipos de movimientos hay unos que revisten especial importancia; son los movimientos periódicos, que podrían definirse como aquellos en los que el objeto pasa por una misma posición a intervalos regulares de tiempo. Los planetas, las moléculas o las cuerdas de un instrumento musical realizan movimientos periódicos, y también los resortes sometidos a la acción libre de un peso o fuerza que actúe sobre ellos. Lo que caracteriza a todos ellos es que se mueven bajo la acción de una fuerza recuperadora y que en su trayectoria pasan siempre por una posición de equilibrio.

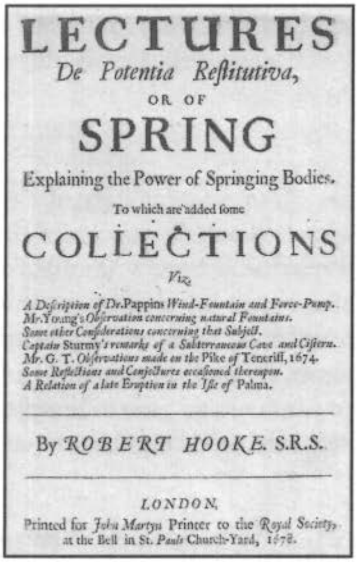
Supongamos que tenemos un cuerpo de masa m apoyado en un plano horizontal en el que hay una ausencia total de rozamiento y que está sujeto a la pared mediante un muelle que tiene una constante recuperadora k.

Aplicamos una fuerza F hacia la izquierda, de manera que el bloque se desplace una distancia x. Si tomamos como origen de medidas la posición original —podemos imaginar que está sobre una regla milimetrada que tiene marcas a la derecha y a la izquierda del punto 0—, la x tendrá un valor positivo. Sobre la masa aparecerá una fuerza recuperadora que vendrá dada por la ley de Hooke:

$$F = -k\,\Delta x.$$

En el momento en que dejemos de ejercer la fuerza inicial, el bloque se verá sometido a esta única fuerza recuperadora, que lo devolverá a su posición original de equilibrio. No se trata de una fuerza constante, ya que irá disminuyendo conforme la distancia x se haga más pequeña hasta valer cero cuando x sea también cero. Lo que ocurre entonces es que el bloque no se parará debido a que lleva una cierta velocidad que hará que rebase la posición de equilibrio y se siga desplazando en el sentido negativo de las x. El




LECTURES
De Potentia Restitutiva,
OR OF
SPRING
Explaining the Power of Springing Bodies.
To which are added some
COLLECTIONS
Viz.
A Description of Dr. Pappins *Wind-Fountain and Force-Pump.*
Mr. Young's *Observation concerning natural Fountains.*
Some other Considerations concerning that Subject.
Captain Sturmy's *remarks of a Subterraneous Cave and Cistern.*
Mr. G. T. *Observations made on the* Pike *of* Teneriff, 1674.
Some Reflections and Conjectures occasioned thereupon.
A Relation of a late Eruption in the Isle of Palma.

By *ROBERT HOOKE.* S.R.S.

LONDON,
Printed for *John Martyn* Printer to the *Royal Society*, at the Bell in St. *Pauls* Church-Yard, 1678.



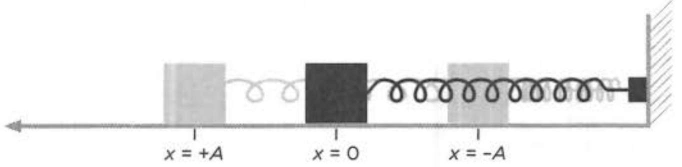
FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Lámina publicada en la obra de Hooke *De potentia restitutiva* en la que se representa la «balanza filosófica sin pesos», tal y como la llamó Hooke. En la parte superior de la lámina puede observarse el muelle plano enrollado en forma de espiral, que sería utilizado para la fabricación de relojes de cuerda.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Portada de *De potentia restitutiva, o sobre los resortes que explican el poder de los cuerpos elásticos* (1678).

FOTO INFERIOR:
Retrato conmemorativo de Robert Hooke para la Christ Church de Oxford, donde estudió a partir de 1653. La imagen muestra a Hooke rodeado de algunas de sus invenciones. Óleo pintado por Rita Greer en 2011.

A partir de un punto de equilibrio ($x = 0$), la elongación máxima (A) representa las posiciones extremas que alcanza en su movimiento periódico.

FIG. 4



muelle entonces se comprimirá y la fuerza recuperadora actuará ahora en sentido contrario a la anterior, fuerza que frenará al objeto y una vez se pare lo impulsará hacia la izquierda, de nuevo hacia su posición de equilibrio, para repetir todo el proceso de nuevo.

«Que las partes de todos los cuerpos vibran por muy sólidos que sean no creo que precise de ulterior prueba que el hecho de que todos los cuerpos poseen en sí algunos grados de calor, no habiéndose encontrado ninguna cosa perfectamente fría.»

— Robert Hooke.

Observemos la figura 4. En la situación ideal que supone la ausencia total de cualquier tipo de rozamiento, el bloque oscilará continuamente alrededor de su posición de equilibrio, realizando así un movimiento periódico. No es difícil demostrar que en estas condiciones el movimiento queda restringido a un cierto intervalo A, de manera que cuando se desplaza hacia la izquierda llega hasta una longitud $+A$, y cuando lo hace hacia la derecha hasta $-A$. Esta distancia recibe el nombre de «amplitud del movimiento periódico».

Este movimiento que acabamos de analizar es un tipo muy concreto de movimiento periódico que se denomina *movimiento armónico simple* (MAS), que se caracteriza por la presencia de una fuerza restauradora que es directamente proporcional al desplazamiento que actúa en ausencia de rozamientos. En un MAS hay ciertos parámetros que lo determinan, como son:

— Elongación (x): distancia a la que en un momento dado se encuentra el objeto de su posición de equilibrio.

— Amplitud (A): elongación máxima.

— Oscilación o vibración completa: movimiento realizado desde la posición de equilibrio hasta que vuelve a la misma, pero en el mismo sentido. Es decir, cuando vuelve por segunda vez —primero lo alcanza cuando se dirige a la izquierda y luego lo vuelve a alcanzar cuando se dirige a la derecha—.

— Período (T): tiempo que tarda en realizar una oscilación completa.

— Frecuencia (f): número de vibraciones completas que realiza por unidad de tiempo. El período y la frecuencia son magnitudes inversas: $T = 1/f$.

No es difícil demostrar que en un MAS el período viene dado por

$$T = 2\pi\sqrt{(m / k)},$$

siendo m la masa del objeto que oscila y k la constante recuperadora.

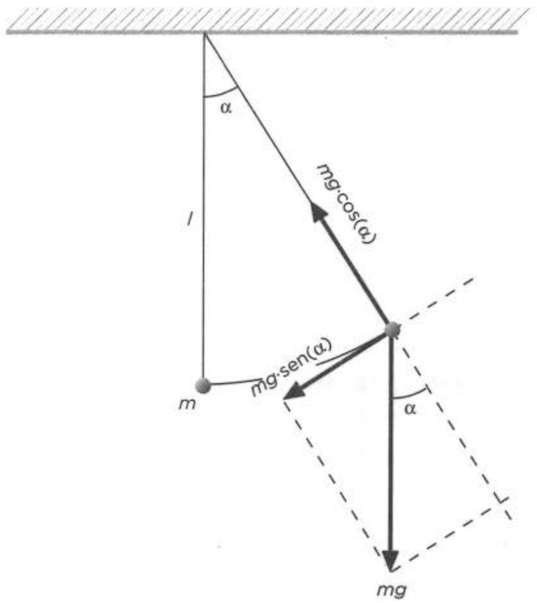
PÉNDULOS

El movimiento de un péndulo ideal es también un movimiento armónico simple, aunque algo más complejo que el de un resorte. En física se entiende por péndulo simple aquel en el que la masa que oscila es puntual (carece de dimensiones), el hilo que lo sustenta es inextensible y sin peso, y el ángulo de oscilación es pequeño (menos de 15° alrededor de su posición de equilibrio). En la mayoría de condiciones, un péndulo real (péndulo físico) se ciñe razonablemente bien a las ecuaciones establecidas para un péndulo simple.

Observemos la figura 5. Consideremos un péndulo simple de masa m suspendido de un hilo de longitud l que se aparta de su posición de equilibrio un arco de longitud x. La complejidad frente al movimiento del resorte viene dada porque en este caso el movimiento no es lineal, sino circular. Consideremos una posición en la que el hilo forma un ángulo α con la vertical. Sobre la masa actúan la fuerza de la gravedad, es decir el peso mg y la tensión del hilo. Descompongamos mg en dos componentes, una en la dirección del hilo $mg \cdot \cos(\alpha)$ y otra en la dirección de la tangente al arco de circunferencia, que vendrá dada por $mg \cdot \text{sen}(\alpha)$. En un péndulo en movimiento, la tensión y la componente perpendicular del peso solo están en equilibrio en los extremos de la oscilación donde la velocidad es cero. En el resto de puntos del movimiento, existe una aceleración centrípeta, que es proporcional al cuadrado de la velocidad, causada por el desequilibrio entre estas dos fuerzas y responsable de hacer

En un péndulo simple, el peso *mg* es una fuerza que puede descomponerse en dos, una en la dirección de la cuerda que sustenta el peso, y la otra, perpendicular a esta y tangente a la circunferencia que describe el movimiento.

FIG. 5



girar a la lenteja. De hecho, como este desequilibrio depende de la velocidad de la masa, el hilo se puede romper si la velocidad del sistema es lo suficientemente alta para que la componente perpendicular del peso supere la tensión máxima que soporta el hilo. En la dirección de la tangente no hay equilibrio, ya que actúa lo que podríamos considerar una fuerza recuperadora:

$$F = -mg \cdot \text{sen}(\alpha).$$

Esta ecuación es muy parecida a la que hemos planteado con la ley de Hooke, solo que en lugar de una distancia aparece una función trigonométrica. Para poder tratar el movimiento como un MAS necesitamos que esta fuerza sea proporcional al ángulo α y no al seno del mismo. Este es el motivo por el que en un péndulo simple se consideran ángulos lo suficientemente pequeños, ya que ello permite reemplazar el valor del seno por el del arco, quedando perfectamente delimitado el margen de error (para ángulos pequeños, por ejemplo $\alpha = 0{,}2$ rad, el valor del seno es 0,198). Así, si sustituimos el seno por el arco, nos queda:

$$F = -mg\alpha.$$

La relación que hay entre la longitud de un arco (x) y el ángulo que lo determina (α) viene dada por el radio de la circunferencia, que en este caso es la longitud del hilo (l):

$$x = l \cdot \alpha,$$

de manera que la fuerza recuperadora será:

$$F = -mg\alpha = -\,x \cdot mg/l.$$

Y ahora la fuerza recuperadora es proporcional a la elongación x con una constante de recuperación:

$$k = mg/l.$$

Aplicando la fórmula del período para un movimiento armónico simple, queda:

$$T = 2\pi\sqrt{(m / k)} = 2\pi\sqrt{(m / mg / l)} = 2\pi\sqrt{(l / g)}.$$

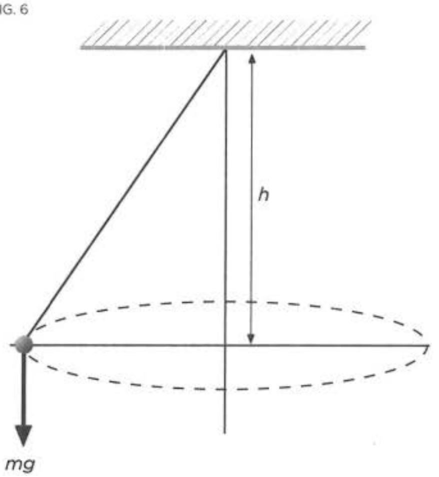
En esta ecuación no figura A, la amplitud del movimiento periódico, lo que supone una ventaja crucial en la utilización del péndulo para la construcción de relojes. Cuando la energía decrece, cosa que sucede cuando la cuerda se está acabando, la amplitud del movimiento se va haciendo cada vez más pequeña, pero esto no implica que el reloj se adelante o se atrase, ya que el período no depende de la amplitud.

EL PÉNDULO CÓNICO

Un péndulo plano, como el que se ha descrito, presenta inconvenientes a la hora de ser utilizado como maquinaria de un reloj. Por un lado, para que un péndulo físico se ajuste a las ecuaciones de un péndulo simple es necesario que el ángulo de oscilación sea muy pequeño; pero, por otro lado, hay que suministrar al péndulo algún tipo de energía. La masa de la lenteja oscila por la acción de la gravedad, pero en un péndulo real el rozamiento, tanto el de la propia maquinaria, como el debido al aire, hace que la amplitud de la oscilación se vaya reduciendo poco a poco.

En un péndulo cónico, la cuerda que sustenta la masa describe la generatriz de un cono.

FIG. 6



Una de las aportaciones más importantes de Hooke fue la introducción del muelle de resorte, que se regía por la ley que él mismo había propuesto. Este nuevo dispositivo suponía una reducción del tamaño de los relojes y como consecuencia la posibilidad de hacerlos más fácilmente transportables, algo que, como ya se ha señalado, fue crucial para la navegación.

El físico, astrónomo y matemático neerlandés Christiaan Huygens, que había estado estudiando la construcción de relojes, se interesó por los trabajos de Hooke.

Ambos eran conscientes de la dificultad que suponía abastecer de energía mecánica a los relojes, ya que esta debía ser constante. Un exceso de impulso en el mecanismo hace que el período empiece a depender del ángulo de oscilación y que se invaliden las ecuaciones que rigen para el péndulo simple. Una solución propuesta por Hooke para este problema, en la que Huygens también estuvo trabajando durante más de seis años, fue la del péndulo cónico (figura 6).

«Y así como el hombre cayó por comer del árbol prohibido del conocimiento, puede también recuperar el camino, degustando, mediante la observación, de los frutos del Conocimiento Natural, que, por otro lado, nunca fueron prohibidos.»

— Robert Hooke.

En este tipo de péndulo, la masa no realiza un movimiento plano de vaivén, sino que, suspendido también de una cuerda, recorre una trayectoria circular o para ser más exactos, en el péndulo que diseñó Hooke, una trayectoria elíptica. Aplicando las leyes de la mecánica y teniendo en cuenta la aceleración centrípeta a la que se ve sometida la masa, se llega a una ecuación del tipo:

$$T = 2\pi\sqrt{(h / g)},$$

donde h es la distancia que hay entre el plano de oscilación y el punto de sujeción de la cuerda. Ahora T no representa un período de oscilación, sino un período de giro que se medirá en segundos. La mayor ventaja que presenta este péndulo frente al péndulo plano es que no interviene ninguna función trigonométrica, como era el caso del seno en el péndulo plano, que obligaba a considerar oscilaciones lo suficientemente pequeñas como para permitir sustituir el seno por el ángulo. Ahora h es una longitud que puede tomar cualquier valor, sin que ello afecte a la validez de la ecuación.

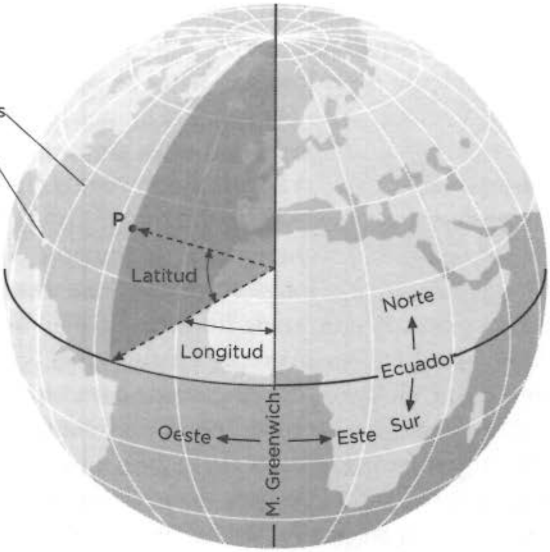
Como se tratará en el capítulo 5, Hooke supo ver una analogía profunda entre el movimiento de un péndulo cónico y el movimiento planetario, analogía que le llevó a plantear la ley de la gravitación universal, anticipándose a los resultados de Newton.

EL PROBLEMA DE LA LONGITUD

Sobre la esfera terrestre se definen una serie de puntos y líneas imaginarios que nos permiten establecer cálculos y sistemas de referencia. Así, hablamos del eje de la Tierra para referirnos a una línea imaginaria alrededor de la cual gira nuestro planeta y en cuyos extremos definimos dos puntos a los que damos los nombres de polo norte y polo sur. El círculo máximo perpendicular a este eje dibuja la línea del ecuador. Con este esquema, la Tierra queda dividida en dos hemisferios, el hemisferio norte y el hemisferio sur. A continuación se definen los paralelos, que son círculos menores «paralelos» al círculo del ecuador. Para indicar un paralelo, basta con especificar a cuántos grados se encuentra por encima o por debajo del ecuador. Hay cuatro de ellos que reciben nombres específicos, que son el trópico de Cáncer, situado a 23° 27' por encima del ecuador, el trópico de Capricornio, también a 23° 27', pero por debajo del ecuador, el círculo polar ártico, a 23° 27' del polo norte, y el círculo polar antártico, a 23° 27' por encima del polo sur. Esta medida de arco, 23° 27', no es caprichosa, sino que es precisamente la inclinación que tiene el ecuador con respecto a la órbita de la Tierra alrededor del Sol y que, además, es determinante en cuanto a la climatología, de manera que quedan establecidas una zona tórrida, dos templadas y dos zonas glaciares.

Un meridiano es cualquier círculo máximo que pase por los polos; son, por tanto, perpendiculares al ecuador. También hay tantos meridianos como se quieran dibujar, aunque dos de ellos reciben nombres especiales, el meridiano del lugar, que es el que pasa por el punto en el que se encuentra el observador y el primer meridiano, que es el que se toma como origen o meridiano cero.

FIG. 7



Para determinar la situación de un punto sobre la superficie terrestre, bien sea en tierra o en el mar, se utilizan las llamadas coordenadas geográficas —como se trata de una superficie bastarán con dos coordenadas—, llamadas latitud y longitud (figura 7). Para comprender mejor su definición, supongamos que estamos en un barco situado en un cierto punto P del océano Atlántico, por el que pasará el que hemos llamado meridiano del lugar. La latitud se define como el arco de dicho meridiano contado desde el ecuador hasta el punto P. Se habla de latitud norte cuando el punto P está por encima del ecuador y de latitud sur cuando está por debajo —habitualmente, los valores de esta última se consideran negativos—. La determinación de la latitud no ha representado nunca un serio problema para los navegantes, ya que se puede llevar a cabo mediante observaciones relativamente sencillas. La longitud se define como el arco de ecuador que va desde el primer meridiano o meridiano cero de referencia, hasta el meridiano del lugar. La longitud puede ser este u oeste, según se encuentre res-

pectivamente a la izquierda o a la derecha del primer meridiano. Los valores de longitud en este último caso también se acostumbran a dar como negativos.

Para el cálculo de la longitud hay que tener en cuenta que la Tierra da una vuelta completa sobre sí misma en 24 horas, que es, por tanto el tiempo que tarda un punto de la misma en recorrer 360°. Si hacemos la división 360/24 = 15°, vemos que por cada hora de diferencia que hay entre el meridiano de Greenwich y el meridiano del lugar se han recorrido 15° de longitud. Por lo tanto, la manera de determinar la longitud es, teóricamente, muy sencilla: basta con conocer la diferencia horaria entre el meridiano cero y el meridiano del lugar en el que se encuentra el barco.

Veamos un ejemplo. Supongamos, para simplificar, que un barco parte de un lugar situado en el meridiano cero. En el momento de zarpar, se sincroniza el reloj de a bordo con la hora de dicho meridiano. Pongamos que, después de un errático viaje de varias semanas, en medio de fuertes tempestades, llega la calma y aparece un cielo despejado de nubes, que permite hacer una medición cuando el Sol se encuentra en el punto más alto. La hora local es, por tanto, las 12 del mediodía. Comprobamos el reloj que marca la hora del primer meridiano y observamos que allí son las 10. Sin ninguna duda, el barco se encuentra a 30° longitud oeste, ya que le separan 2 horas de más ($2 \cdot 15° = 30°$) del meridiano de referencia.

Pero, desgraciadamente, el reloj de a bordo es de péndulo y con los fuertes balanceos del barco se ha adelantado, retrasado o incluso ha llegado a pararse. Esto por no mencionar las contracciones y dilataciones que ha sufrido debido a los bruscos cambios de temperatura o de la influencia de la presión atmosférica y, en menor medida, de los sutiles cambios del campo gravitatorio que pueden alterar el período de oscilación. Si a esto le añadimos que un error de pocos minutos puede llegar a suponer, en según que latitudes, un centenar de kilómetros, la situación de los navegantes era, en este sentido, muy precaria: para una misma longitud, los trayectos recorridos a diferentes latitudes pueden ser desde muy largos, cerca del ecuador, a muy cortos, cerca de los polos.

Dos eran los caminos que podían llevar a la solución del problema de la determinación de la longitud. El primero, que po-

EL MERIDIANO CERO

Así como nadie discute cuál es la ubicación del ecuador, ya que viene dada de forma natural, no sucede lo mismo con el primer meridiano, o meridiano cero, cuya identificación es totalmente arbitraria. Una buena prueba de ello es la larga lista de meridianos cero que, a lo largo de la historia, han merecido este título: empezando por el de las islas Afortunadas, instaurado por Ptolomeo, y posteriormente los que pasaron por las Azores, Cabo Verde, Roma, Copenhague, Jerusalén, San Petersburgo, Pisa, París, Filadelfia y Londres, que es donde se sitúa en la actualidad, concretamente en el Observatorio de Greenwich. La decisión se tomó en 1884, cuando se celebró en Washington el Congreso Internacional del Meridiano. En dicho encuentro quedó establecido, por un acuerdo entre 26 países, que el meridiano de Greenwich sería el meridiano cero, o primer meridiano, y que sería tomado como referencia para los husos horarios de todo el mundo. A pesar de ello, hasta finales de 1911 los franceses siguieron tomando como primer meridiano el que pasaba por el Observatorio de París.



El meridiano cero, situado en el Observatorio de Greenwich, Londres.

dríamos considerar de talante más científico, era la posibilidad de determinar la hora mediante la observación directa del cielo, tarea que quedó encomendada a astrónomos y matemáticos. El segundo, de carácter técnico, era la construcción de un reloj capaz de marcar la hora con exactitud en las condiciones más desfavorables. Astrónomos de la categoría de Galileo Galilei, Edmund Halley o el mismo Isaac Newton emprendieron el primero de estos caminos sin llegar a ningún resultado satisfactorio. Nadie

tenía la solución para resolver un grave problema que tenía como consecuencia que los barcos perdieran su rumbo, alargaran excesivamente las travesías o se perdieran para siempre, con las consiguientes pérdidas en bienes y en vidas humanas. Los gobiernos establecieron todo tipo de recompensas para quien fuera capaz de resolver el problema, la más famosa y cuantiosa de las cuales fue la que estableció el Parlamento británico en 1714, conocido como el Decreto de la Longitud.

«Sabemos que puede haber tanta delicadeza de diseño y excelencia de forma en un diminuto reloj de bolsillo que no ocupa una pulgada cuadrada de espacio, como en el reloj de un campanario que llena toda una habitación.»

— **Robert Hooke.**

Uno de los primeros intentos serios que se hicieron para resolver el problema de la longitud mediante la observación directa de los movimientos planetarios fue el proyecto de Galileo en relación a los satélites de Júpiter. Sus eclipses, es decir, la ocultación de alguna de estas lunas tras el planeta, ocurrían unas mil veces al año y Galileo creyó que, si se llevaban a cabo las suficientes observaciones, se podrían construir tablas que sirvieran a los navegantes para determinar la longitud con precisión. Galileo diseñó una máscara especial de latón con un agujero en el que había un pequeño telescopio. La idea era que los navegantes se la pusieran y mediante el ojo que quedaba libre se localizara a Júpiter, y con el otro ojo adosado al telescopio se hiciera la observación pertinente de los eclipses de sus lunas, que permitirían la determinación de la hora. El artefacto, muy parecido a una cámara antigás de la Segunda Guerra Mundial, quedó bautizado con el nombre de *cellatore*. A pesar de que Galileo dedicó gran parte de su vida a estas observaciones, el método no resultó práctico, entre otras cosas porque Júpiter y sus lunas no eran visibles durante el día y solo en cielos muy despejados durante la noche.

A lo largo de los años, los astrónomos llegaron a la conclusión de que los únicos objetos celestes que podían servir como

relojes eran el Sol, la Luna y las estrellas o, más exactamente, sus posiciones relativas: durante el día entre el Sol y la Luna y durante la noche entre la Luna y algunas estrellas fijas. A pesar de que este método acabaría por mostrarse como el más eficaz, planteó serias dificultades desde el comienzo. El movimiento aparente de la Luna es muy complejo y además sufre una variación cada dieciocho años, por lo que sus observaciones debían registrarse en períodos que como mínimo abarcaran ese espacio de tiempo. Debía disponerse además de cartas del cielo en las que figuraran un número suficiente de estrellas, con sus posiciones relativas respecto a la Luna, en fechas concretas y en lugares que abarcaran los dos hemisferios. En muchos países se fundaron observatorios astronómicos con este único objetivo, se hicieron las observaciones pertinentes y se crearon e imprimieron tablas de las que podían disponer los navegantes, con lo que se llevó a cabo una de las primeras colaboraciones internacionales de la historia en un proyecto científico. Solo faltaba un elemento para que el método pudiera llevarse a la práctica de una manera eficaz: un instrumento que hiciera posible la observación desde un buque en alta mar. Dicho elemento llegó de la mano de dos inventores, el inglés John Hadley (1682-1744) y el norteamericano Thomas Godfrey (1704-1749), quienes de forma independiente dieron con la solución al crear un ingenioso instrumento óptico, que recibió el nombre de «octante», y que mediante un juego de espejos permitía la observación simultánea de dos objetos celestes. Más tarde este instrumento, al que se llamó «sextante», se perfeccionó adicionándole, entre otras mejoras, un horizonte artificial.

Hooke estuvo trabajando durante años en el diseño de un reloj que pudiera ser utilizado con garantías en el curso de una navegación marítima —en 1950 se redescubrió un diseño suyo para un cronómetro marino en la Biblioteca del Trinity College, en Cambridge—, pero no parece que llegara a resultados realmente aceptables. Aun así, su trabajo tuvo consecuencias importantes, ya que, junto con Huygens, mejoró sustancialmente la maquinaria básica de los relojes. Hooke proclamó airadamente la autoría del reloj de muelle porque este fue diseñado mucho antes que el de Huygens, pero de nuevo fue ninguneado.

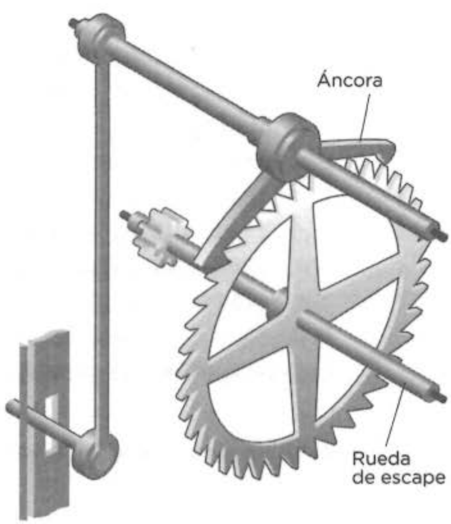
CUANDO LOS RELOJES EMPEZARON A HACER TIC-TAC

Durante siglos, por no decir milenios, la medida del tiempo se hacía observando los movimientos de ciertos procesos naturales. Entre estos, el movimiento del Sol es sin duda el más primitivo y se conoce como «tiempo solar aparente», ya que «aparente» es el Sol que podemos observar directamente. Una técnica algo más sofisticada y que requiere de mayores conocimientos es la utilización de cuadrantes solares en los que la sombra proyectada por una varilla va marcando el paso del tiempo a lo largo del día. Se trataba de un conjunto de dispositivos, unos más sofisticados que otros, que en definitiva medían el tiempo por el movimiento de las sombras. Uno de los relojes más antiguos que podían ser utilizados en el interior de las casas o en días nublados era la clepsidra, un reloj de agua que se basaba en el tiempo que tardaba en vaciarse un recipiente lleno de líquido; el sistema es análogo al que se emplea en los relojes de arena. Todos estos sistemas se caracterizaban por la dificultad de definir una unidad de tiempo y por el hecho de que en todos ellos el tiempo fluía de forma continua.

Los primeros relojes mecánicos no hicieron su aparición en Europa hasta el siglo XIV (en China datan del siglo X). Estaban construidos mediante mecanismos muy rudimentarios basados en un peso que descendía por la fuerza de la gravedad y que pendía de una cuerda enrollada en un cilindro, de manera que al descender hacía rodar el cilindro, que a su vez movía la maquinaria del reloj. Al no existir todavía ni esfera, ni agujas, las horas se marcaban mediante campanadas. Eran relojes grandes que se construían en el interior de los campanarios, en los que la persona encargada hacía sonar las campanas previa consulta del reloj. El problema era que el peso que accionaba los mecanismos no descendía con velocidad uniforme, ya que, al estar sometido a la acción de la gravedad, la velocidad iba creciendo conforme descendía, de manera que la precisión de estos relojes dejaba mucho que desear. Una parte del problema se resolvió con la introducción de un ingenioso dispositivo, atribuido a Hooke, llamado «escape», formado por una rueda dentada, un áncora y un péndulo

(figura 8). El áncora traba la rueda de escape en uno de sus extremos. Cuando se balancea, la libera para dejarla trabada con el otro extremo. Este balanceo del áncora se consigue mediante un péndulo. Y así es como nació lo que hoy conocemos como el «tic-tac», y también fue así como el tiempo dejó de ser observado como un proceso continuo para pasar a convertirse en una serie «discreta» de intervalos.

FIG. 8



Pero aún habría que resolver otro serio problema: los relojes se adelantaban conforme se acababa la cuerda que sujetaba el péndulo, con lo que las primeras horas eran más largas que las últimas. Ello era debido a que, en su recorrido, los péndulos seguían una trayectoria circular. Hay una manera fácil de entender este asunto si se observa la trayectoria pendular de una bola al dejarla caer en el interior de un objeto con forma de semicircunferencia —se puede realizar el experimento con un bol esférico—. Se aprecia que la bolita irá describiendo trayectorias cada vez más cortas hasta que finalmente se parará, que es equivalente a que al reloj se le acabe la cuerda. Está claro que cuando la bola está a una altura mayor, tarda más en llegar al centro que cuando se encuentra más cerca de este, ya que el recorrido es menor, causa por la que los relojes se adelantaban.

La pregunta que se planteó entonces fue: ¿existe alguna curva en la que esto no suceda?, es decir, ¿una curva en la que la pendiente y la distancia a la base estén relacionadas de forma que la velocidad de caída y el espacio recorrido se compensen? La solución debería ser una curva en la que el tiempo que tarda la bolita en llegar al vértice de la base sea el mismo sin impor-

tar la altura desde la que se la deja caer, motivo por el cual esta curva, ya antes de haber sido descubierta, recibió el nombre de «tautócrona», que quiere decir igual tiempo.

En 1673, Christian Huygens demostró que la cicloide poseía las características requeridas para ser una tautócrona. La curva cicloide (figura 9) se define como la trayectoria que describe un punto situado sobre una circunferencia cuando esta gira, sin deslizar, sobre una recta.

A Huygens se le ocurrió que si un péndulo describía en su movimiento una cicloide, no importaría la altura de la que partiera el péndulo en cada oscilación, pues igual que sucedía con la bola en el cuenco, el tiempo que tardaría en llegar a la parte más baja siempre sería el mismo.

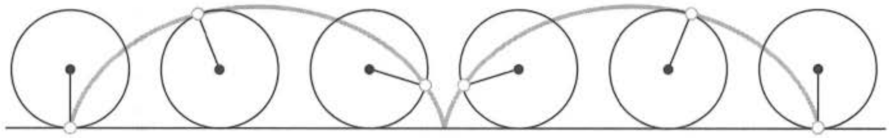
JOHN HARRISON



Grabado de John Harrison realizado en 1768 por Philippe Joseph Tassaert.

En la carrera emprendida para la búsqueda de los relojes del cielo, John Harrison (1693-1776), un desconocido relojero totalmente autodidacta y al que se puede calificar de genio sin ningún género de duda, había emprendido en solitario la construcción de un reloj que habría de marcar un auténtico hito en la historia de la relojería. Dedicó cinco años a la fabricación del primer reloj marino, el Harrison n.° 1, conocido como H-1. Dicho reloj —todavía en funcionamiento en el Museo Marítimo Nacional de Londres— pesaba 20 kg, estaba resguardado por una vitrina cuadrada de cristal de 1,20 m de lado, llevaba engranajes de madera, carecía prácticamente de fricciones y, en duras condiciones de navegación, apenas se retrasaba unos segundos al día. Era el año 1735 y había nacido el primer cronómetro de la historia. Sin embargo, uno de sus principales detractores fue el propio Harrison, quien decidió mejorarlo en una nueva versión, el H-2, de tamaño algo menor que el primero y que cumplió sobradamente todas las expectativas de

FIG. 9



Pero, ¿cómo se puede conseguir que la curva que describe el péndulo sea un arco de cicloide? La solución a este problema está en una de las propiedades más fascinantes de la cicloide: «la evoluta de una cicloide es también una cicloide». El concepto de evoluta es demasiado complicado para explicarlo aquí, pero

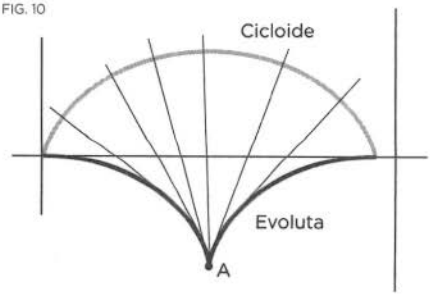
La cicloide es la curva que describe un punto de una circunferencia que rueda sin deslizar sobre una superficie plana.

un reloj marino. Aun así, Harrison inició la construcción del H-3, al que estuvo dedicado durante diecinueve años más, que incorporaba un péndulo de rejilla construido con dos materiales diferentes para compensar los cambios de temperatura y que introducía, por primera vez en la historia, cojinetes de bolas. El H-3 pesaba 27 kg y tenía unas dimensiones de 0,30 x 0,30 x 0,60 m. A esas alturas, Harrison era merecedor con creces del premio de la longitud que, sin embargo, no le fue otorgado. Y es que en la guerra emprendida contra Harrison durante todos esos años, que en algunos de sus episodios podría ser calificada de guerra sucia, estaban en juego intereses de mucho peso.

La «Mona Lisa» de los relojes

El sistema de la determinación de la longitud por medios astronómicos requería de una importante financiación a nivel internacional, que podía quedar cuestionada con el invento de Harrison: el cálculo de la longitud mediante observaciones del cielo requería un tiempo no inferior a tres horas de trabajo y el concurso de gente experta en cálculos matemáticos. En contrapartida, el reloj de Harrison lo podía utilizar cualquiera y proporcionaba una medida de la longitud muy precisa y casi al instante. A pesar de todo, Harrison continuó perfeccionando su reloj hasta que en 1759 concluyó la que por fin consideró como su obra maestra, el H-4, conocida como la «Mona Lisa» de los relojes. Con un peso cercano a 1,5 kg y un diámetro de 12,5 cm, fue el primer cronómetro marino de bolsillo. Por primera vez en la historia de la relojería, varios de los ejes de su mecanismo estaban encastados sobre diminutos diamantes y rubíes. Con el H-4, Harrison ganó el premio de la longitud.

FIG. 10



Dese la vuelta al dibujo e imagínese un hilo sujeto en A. Al dejarlo caer desde cualquiera de los extremos marcados por la evoluta, dibujará una cicloide. Si de este último se cuelga un objeto de cierto peso, se tendrá un péndulo cuya lenteja tendrá un mismo período de oscilación con independencia de su amplitud.

podemos ver en qué se traduce geométricamente dicho resultado. Imaginemos que partimos por la mitad una cicloide y que juntamos ambas mitades en un vértice A, como en la figura 10.

Si construimos el péndulo de manera que la cuerda esté sujeta en A y el movimiento quede limitado a ambos lados por la evoluta, la masa del péndulo —la lenteja— describirá una cicloide. Su movimiento será semejante al de la bolita dentro del cuenco, de manera que el período de oscilación será siempre el mismo, aunque la amplitud vaya disminuyendo. Huygens había encontrado la manera de confeccionar un péndulo autoajustable sin más que darle la vuelta al dibujo anterior, de manera que el movimiento del péndulo quedara constreñido a las dos ramas de la cicloide.

En otro orden de cosas, que nada tiene que ver con los relojes, pero basándose en esta misma propiedad —y en un auténtico alarde de ingenio—, Hooke propuso el modelo de un dispositivo para molinos de viento que reorientara constantemente las palas en la dirección del viento.

CAPÍTULO 4

El astrónomo

La astronomía fue la disciplina a la que más esfuerzos dedicó Hooke, ya que sus trabajos y observaciones abarcan un período de más de cuarenta años. Como es habitual, sus aportaciones se reparten por igual en el desarrollo de nuevos dispositivos y en las conclusiones teóricas a que le conducen las observaciones que realiza con los nuevos instrumentos ópticos, entre las que hay que destacar su aportación a lo que más adelante se acabaría convirtiendo en la teoría de la gravitación universal.

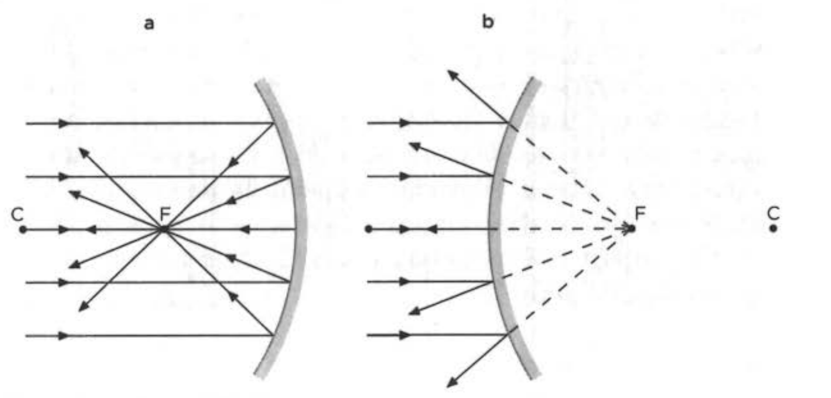
Existe un error muy difundido según el cual un telescopio es un dispositivo óptico cuya función es atraer la imagen de un objeto hacia el observador. En realidad, la función del sistema óptico de un telescopio de refracción es la de ampliar el campo de visión en un determinado sector del objeto observado, y esto se consigue gracias a la capacidad de refracción que poseen determinadas sustancias transparentes. Recordemos que la refracción es un fenómeno óptico por el cual un rayo de luz es desviado de su trayectoria cuando pasa de un medio a otro. Una lente convergente es aquella que se construye de manera que los rayos de luz que inciden en ella paralelamente se refracten de manera que converjan en un punto —para un objeto lo suficientemente alejado, siempre se puede considerar que los rayos de luz que llegan hasta el observador son paralelos—. Esto permite que objetos lejanos puedan verse más brillantes, más nítidos y cercanos, de manera que mediante este sistema de lentes convergentes la porción de imagen que llega al objetivo es mucho más pequeña que la original. El origen de este tipo de telescopios se remonta a principios del siglo XVII y se le atribuye al astrónomo alemán y fabricante de lentes Hans Lippershey (1570-1619).

Con la aparición de nuevos materiales y sobre todo con las mejoras en las técnicas del pulido de lentes, se fue incrementando la calidad de los telescopios refractores, pero aun así seguían

adoleciendo de serias limitaciones que mermaban su uso para determinadas observaciones astronómicas. Hay que tener en cuenta que era difícil construir lentes de calidad lo suficientemente grandes, que por otro lado pueden resultar excesivamente pesadas. También era complicado evitar que, en el proceso de construcción, se formaran burbujas que una vez acabada la lente eran imposibles de quitar y que obviamente enrarecían la visión. Además, se da la circunstancia de que algunos cristales no permiten el paso de determinadas longitudes de onda de la luz, por lo que parte del espectro lumínico se ve afectado, lo que contribuye a empeorar la calidad de la imagen. Es el fenómeno que se conoce como *aberración cromática* y que acaba proporcionando una imagen diferente para cada color, debido a la diferencia de distancia focal para cada longitud de onda.

Otra limitación que también distorsiona la imagen es la *aberración esférica*, que se produce porque los rayos que están más próximos al eje óptico convergen en un foco ligeramente distanciado del de los rayos que están más alejados. Se considera que cuando un objeto está a mucha distancia del espejo, los rayos procedentes de dicho objeto inciden paralelos sobre la superficie del espejo. En el caso de un espejo convergente, como el mostrado en la figura 1a, los rayos paralelos incidentes convergen todos en un punto F llamado foco. La línea que une el foco con el centro

FIG. 1



LOS TELESCOPIOS DE GALILEO

Galileo, siguiendo el diseño de Lippershey, construyó varios telescopios. El primero de ellos en 1609, que solamente era capaz de proporcionar tres aumentos. A finales de ese mismo año y después de varias pruebas, mediante una lente de 37 mm de diámetro construyó un telescopio de veinte aumentos, con lo que consiguió una abertura de campo suficiente como para ver hasta un 25 % de la Luna. Más adelante llegaría a construir otro de treinta aumentos, que fue la máxima cota que pudo alcanzar y, a pesar de sus limitaciones, le permitió observar por primera vez los cráteres de la Luna y algunas manchas solares.

Cuestión de aumento

Los aumentos son importantes cuando lo que se quiere observar son objetos relativamente cercanos, como los planetas de nuestro sistema solar. En astronomía, el concepto de aumento está bien definido como la relación o cociente que se establece entre la distancia focal del objetivo y la distancia focal del ocular. Existe una relación de compromiso entre los aumentos y el diámetro del objetivo que limita la eficacia de los telescopios refractores: el máximo número de aumentos no puede ser superior al doble del diámetro del objetivo, expresado en milímetros. Por ejemplo, si el diámetro del objetivo del telescopio es de 50 mm, la configuración del sistema óptico no debe proporcionar un número de aumentos superior a cien, ya que a partir de esta cantidad la imagen se empieza a distorsionar.



Réplica de un telescopio atribuido a Galileo, expuesto en el Observatorio Griffith, en Los Ángeles, California, Estados Unidos.

de curvatura del espejo (C) se denomina eje óptico, y es perpendicular al plano del espejo. En el caso de un espejo divergente como el mostrado en la figura 1b, los rayos divergen como si procedieran de un foco de F. A la distancia que hay entre el vértice del espejo y el foco se la denomina distancia focal. El valor de dicha distancia es igual a la mitad del radio de curvatura del espejo. Un telescopio astronómico forma en su foco la imagen de una estrella.

El matemático y astrónomo escocés James Gregory (1638-1675) tuvo una brillante idea al diseñar un original sistema que podía soslayar las limitaciones impuestas por el telescopio refractor. La descripción de este diseño apareció en su obra titulada *Optica promota*, publicada en 1663. La idea era utilizar espejos en lugar de lentes para enfocar la luz (figura 2). El espejo secundario tiene forma parabólica, con lo que elimina la aberración cromática y atenúa la esférica. Fue el primero de los telescopios reflectores, aunque en su época fue conocido como «telescopio gregoriano».

Pero todo esto era sobre el papel, ya que casi nadie se había embarcado en la ingrata tarea de construir un telescopio de estas características, una tarea nada fácil dado que, entre otras cosas, requiere disponer de la técnica suficiente para pulir un espejo con la forma adecuada.

El primero en llevar a cabo la construcción de un telescopio gregoriano fue Hooke, quien movido una vez más por la curiosi-

Esquema de un telescopio reflector en el que el par de espejos, primario y secundario, conducen la imagen hasta el ocular.

FIG. 2

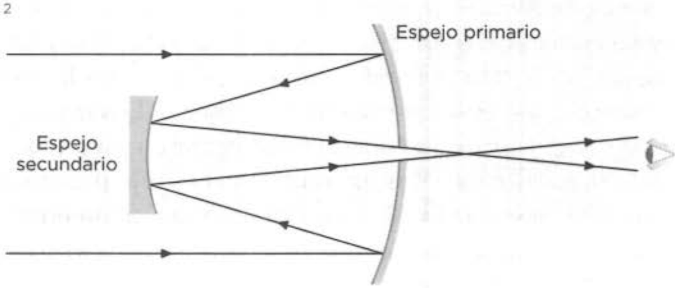
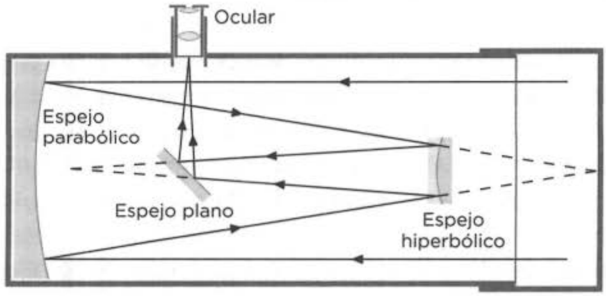


FIG. 3



Esquema de un telescopio tipo Cassegrain como el construido por Hooke.

dad y el interés científico, puso en juego su asombrosa capacidad para materializar dispositivos muy sofisticados para la época.

> «Los instrumentos son para rectificar nuestros sentidos caídos y corruptos, supliendo sus enfermedades con instrumentos y por la adición de órganos artificiales a los naturales.»
>
> — ROBERT HOOKE.

El modelo que construyó Hooke se corresponde con el que actualmente conocemos como Cassegrain (figura 3), que consiste en un tubo abierto con tres espejos. El espejo principal se sitúa en el fondo del telescopio y tiene forma de paraboloide, presentando la parte cóncava hacia la abertura, y es en el que inciden los rayos paralelos provenientes del exterior, haciéndolos converger en un punto que puede estar situado fuera del tubo, de manera que la distancia focal resulta más larga que la longitud del telescopio, que es lo que Hooke se propuso. Los rayos provenientes del espejo principal son reflejados por un segundo espejo hiperbólico, que a su vez los proyecta en el espejo principal que, con una inclinación de 45°, los hacen converger al objetivo. Este diseño tiene la ventaja de acortar la longitud del tubo y atenuar en parte las aberraciones que se producían en los telescopios refractores.

LA TEORÍA HELIOCÉNTRICA

En 1543 se produjo un hito en la historia de la astronomía con la aparición de la obra del polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) *De revolutionibus orbium coelestium* («Sobre el movimiento de las esferas celestiales»), marcando lo que iba a ser el final de la teoría geocéntrica de Cláudio Ptolomeo (100-170), según la cual todos los planetas del sistema solar giraban alrededor de la Tierra siguiendo una órbita circular. La teoría de Copérnico tenía como consecuencia que, ya que era la Tierra la que giraba alrededor del Sol, las estrellas debían tener un movimiento anual aparente, movimiento que se mostraría bajo la forma de una paralaje y que acabaría siendo determinante para demostrar la teoría heliocéntrica.

Un siglo después, Johannes Kepler (1571-1630) estableció la teoría heliocéntrica mediante sus tres famosas leyes que, además de definir la naturaleza elíptica de las trayectorias, cuantificaba distancias y áreas barridas. Hooke se propuso proporcionar una prueba concluyente de que los planetas, en concreto la Tierra, giraban alrededor del Sol. Para ello se planteó el reto de calcular la paralaje anual, ya que esta, junto con la aberración estelar, son dos pruebas fundamentales de que la Tierra se mueve alrededor del Sol.

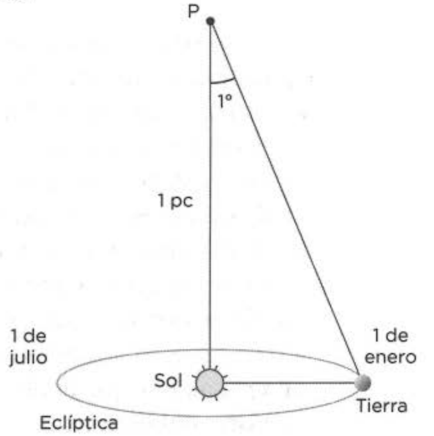
PARALAJE

En términos sencillos, la paralaje es el cambio aparente de la posición de un objeto observado, producido por una variación de la posición del observador. En astronomía se definen distintos tipos de paralaje, pero vamos a referirnos a la llamada paralaje anual (figura 4), que es la que tiene una relación más directa con la distancia a las estrellas.

La paralaje hace referencia directa al ángulo bajo el que se ve una estrella desde diferentes posiciones en las que se encuentra la Tierra en el momento de la observación. Los antiguos

astrónomos griegos ya estaban atentos al tema, pero al no tener constancia en sus observaciones de la presencia de ninguna paralaje, llegaron a la conclusión de que la Tierra no se movía alrededor del Sol. Lo que no sabían —ni podían saber— es que las estrellas se encuentran, en relación a nosotros, varios millones de veces más lejos que el Sol, lo que tiene como consecuencia la imposibilidad absoluta de detectar el efecto de la paralaje a simple vista.

FIG. 4



Cálculo de la paralaje anual que conduce a la definición de pársec.

Para objetos relativamente cercanos, como la Luna, el problema aún puede resolverse haciendo observaciones desde observatorios terrestres que estén muy alejados entre sí, pero cuando se trata de estrellas lejanas las cosas se complican. Además, en este caso hay una dificultad añadida, y es que en la esfera celeste todo se mueve, y más deprisa de lo que parece. Existe un movimiento diurno debido al movimiento de rotación de la Tierra, y otro anual debido a la traslación de esta alrededor del Sol. La clave para resolver el cálculo de la paralaje estaba en este último movimiento.

La órbita que la Tierra sigue alrededor del Sol permite realizar observaciones de una misma estrella desde puntos lo suficientemente alejados entre sí, de manera que la paralaje anual puede definirse como el cambio de la posición aparente de una estrella cuando la observación se hace desde lados opuestos de la órbita terrestre.

A lo largo de seis meses la Tierra recorre una distancia de 150 millones de kilómetros. Si ahora tenemos en cuenta que la estrella más cercana, que es Alfa Centauri, se encuentra aproximadamente a 40 billones de kilómetros de distancia, se comprenderá fácilmente que la paralaje anual de una estrella difícilmente puede superar el segundo de arco.

EL «MOTOR DE ARQUÍMEDES»

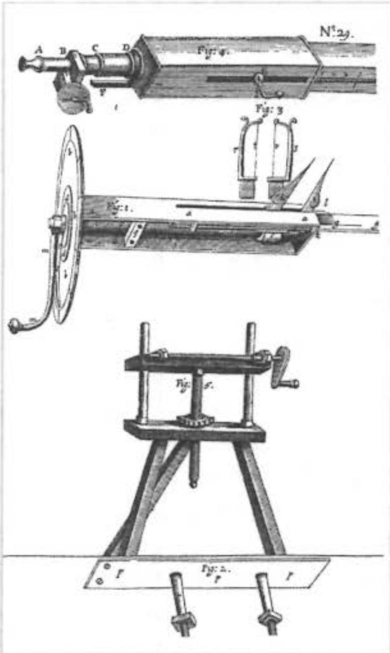
Gamma Draconis (γ-Draconis) era una estrella bien conocida por los astrónomos del siglo XVII, y tenía la peculiaridad de pasar por la vertical de Londres todos los días.

Hooke realizó sus observaciones de γ-Draconis en julio y octubre de 1669 llegando a la conclusión de que la paralaje era de 23 segundos de arco. Está claro que Hooke se equivocó en la medición. Sin embargo, esto no es del todo cierto, porque lo que en realidad hizo no fue medir la paralaje, sino detectar un fenómeno conocido como «aberración estelar» que no sería explicado hasta más de cien años después, cuando en enero de 1729 el astrónomo inglés James Bradley (1693-1762) lo expuso a la Royal Society. Y no fue hasta 1748 que el mismo Bradley anunció otro fenómeno, la nutación, que también afectaba a la observación y que, sin duda, debido a las condiciones en que Hooke llevó a cabo la medición de la paralaje, tuvo que tener una marcada influencia en sus cálculos.

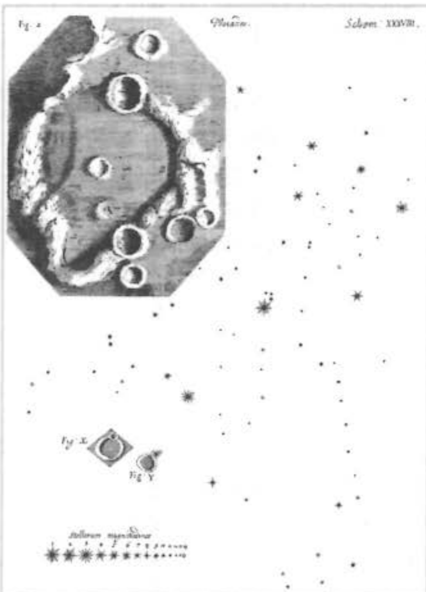
La nutación es el típico movimiento de cabeceo que vemos en los trompos cuando están girando y que en general afecta a los sólidos que tienen un movimiento de rotación sobre su propio eje, como es el caso de la Tierra. Este movimiento hace que el eje describa un movimiento circular alrededor de su centro y es el responsable de que las estrellas parezcan —como le parecieron a Bradley— oscilar de forma aparentemente errática. Y también será el responsable de que la estrella polar no sea nuestra eterna guía de los cielos, ya que debido a la nutación la dirección cambia, poco, pero cambia.

Hooke era consciente de que los telescopios de que disponía para este tipo de observaciones, ya fuera el reflector o el refractor, no eran los adecuados para determinar con precisión la posición de una estrella. Fue entonces cuando desarrolló la idea de construir un telescopio cenital.

Ya que Gamma Draconis era una estrella que pasaba por el cénit de Londres todos los días, Hooke pensó que lo mejor sería medir su paralaje apuntando el telescopio directamente hacia arriba, en la vertical del lugar. Primero lo intentó, junto con







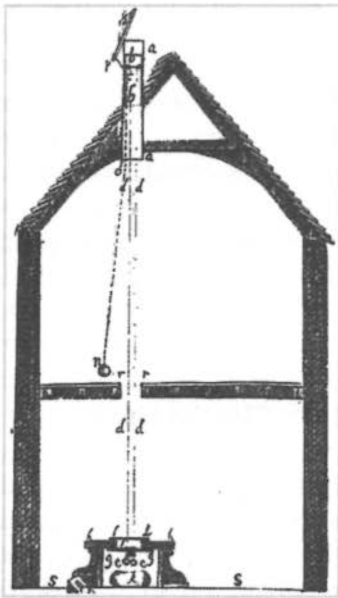


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
El tornillo micrométrico de William Gascoigne, de 1640, fue un precedente del construido posteriormente por Robert Hooke.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Imagen del telescopio cenital que Hooke diseñó y construyó en el Gresham College. Óleo pintado por Rita Greer en 2008.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Las pléyades, descritas por Hooke en la *Micrografía*.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Grabado del telescopio cenital construido por Hooke en el Gresham College, publicado en su libro *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observations* (1674).

Wren, en la columna dórica, monumento construido en homenaje al gran incendio de Londres, que tenía una altura de más de sesenta metros, pero el movimiento producido por el viento dificultaba mucho las observaciones, y decidió abandonar el proyecto cuando por accidente se rompió la lente del objetivo. La única manera de evitar todos estos percances era construir el observatorio en un recinto completamente cerrado. Al final se decidió por montarlo en sus habitaciones del Gresham College, practicando un orificio en el tejado, de manera que el objetivo quedara dos pisos más abajo. Hooke llamó a este telescopio el «motor de Arquímedes».

Otro problema que debía resolverse era el de disponer de un sistema de movimiento de alta precisión. Para ello, Hooke construyó un nuevo dispositivo de los que forman su larga lista y que ha quedado como patrimonio tecnológico, ya que se sigue utilizando actualmente. Se trata del micrómetro o tornillo micrométrico —del que ya había un antecedente en 1640 atribuido al astrónomo inglés William Gascoigne (1612-1644)—, que consiste en establecer una escala de medidas alrededor de un tornillo de manera que, por multiplicación, giros pequeños se traduzcan en giros más precisos cuya escala se sitúa circularmente en torno al eje de giro.

En el diseño y la elaboración de los nuevos telescopios y de los dispositivos que mejoraran su precisión, Hooke mostró su prodigiosa capacidad de inventiva y de anticipación, ya que los instrumentos propuestos por él fueron los que se usaron en astronomía durante los dos siglos posteriores. Entre ellos hay que destacar también los cuadrantes.

LOS CUADRANTES

El cuadrante mural diseñado por Hooke era una mejora singular del de Tycho Brahe. Siguiendo el diseño de Hooke, el Primer Astrónomo Real británico John Flamsteed (1646-1719), a cuyo cargo estuvo la construcción del Observatorio de Greenwich, hizo cons-

truir en dicho observatorio un cuadrante mural de 3 metros de radio, que iba a ser el instrumento con el que Greenwich iniciaría su gran catálogo de estrellas. Estaba formado por un semicírculo adosado a un muro construido en la dirección del meridiano. La estructura era toda de latón para aligerar el peso y evitar las posibles dilataciones que se hubieran producido en caso de utilizar diferentes materiales. Tenía montados dos telescopios, uno fijo en posición horizontal y otro móvil, ambos dispuestos de tal forma que sus imágenes pudieran interponerse. El cuadrante, que fue totalmente diseñado por Hooke, estaba dotado de tornillos micrométricos que podían ajustar la graduación milimetrada de los limbos. En las lentes había retículas construidas con hilos de araña. Su precisión rondaba el segundo de arco, y se trató de una construcción modélica que alcanzó una amplia difusión por todos los observatorios del mundo.

Otro de los instrumentos estrella diseñado por Hooke para la observación astronómica es el cuadrante de montura ecuatorial. Cualquiera que haya intentado seguirle el rastro a una estrella con un telescopio de aficionado se habrá dado cuenta de lo escurridizas que son, de lo rápidamente que se salen de nuestro campo de visión. Ello es debido al movimiento de rotación de la Tierra, que tiene como consecuencia el llamado «movimiento aparente» de la esfera celeste. Para evitar esto, lo ideal es que el telescopio disponga de algún mecanismo de relojería que lo haga girar al tiempo que lo hace la esfera celeste —lo que se conoce como tiempo sidéreo—, algo nada fácil. El cuadrante de montura ecuatorial que diseñó Hooke cumplía con estas expectativas —lo de ecuatorial es porque es el círculo máximo sobre el que gira la Tierra—. Para ello, incorporó a la montura un reloj regulado mediante un péndulo cónico, también de su invención, que se ajustaba al movimiento de una estrella sin más que cambiar la longitud del péndulo.

A todo esto añadió, como un dispositivo más, una articulación universal, también conocida como junta cardán, que consiste en el acoplamiento de dos horquillas que están unidas entre sí por un elemento con forma de cruz, donde cada horquilla articula con una de las aspas de la cruz.

EL SEXTO SENTIDO

Uno de los grandes debates públicos que mantuvo Hooke a lo largo de su agitada vida científica tuvo lugar en el terreno de la astronomía. Se trata de la polémica que mantuvo con Johannes Hevelius (1611-1687), un astrónomo polaco de renombrada fama, con el que en los comienzos de su relación mantuvo un trato que podría calificarse de cordial.

El debate se centró en la utilización de los instrumentos. Hevelius era un astrónomo que trabajaba a «ojo desnudo» u ojo abierto, como también se le llama, y que se refiere a la posibilidad de hacer observaciones sin recurrir a instrumentos ópticos, que es como se hacían en la Antigüedad. Hay personas que tienen una gran capacidad visual que les permite apreciar detalles que otros no pueden ver. No cabe duda de que Hevelius era una de esas personas con una gran agudeza visual, pero en este contexto hay que entender que cuando se trabaja a ojo desnudo no se habla de alguien que no use un telescopio, sino de una forma de observación que no utilizaba miras ajustables ni bases sólidas que impidieran movimientos involuntarios. Para sus observaciones, Hevelius utilizaba grandes telescopios refractarios de larga distancia focal. En el terrado de su casa tenía instalado un telescopio abierto de más de 45 metros de longitud focal que podía verse desde cualquier parte de la ciudad.

Entre 1665 y 1668, Hooke y Hevelius mantuvieron una cortés correspondencia en la que intercambiaron datos y opiniones sobre sus observaciones astronómicas. Hevelius le pidió en una ocasión a Henry Oldenburg (1619-1677), por entonces secretario de la Royal Society, que le aconsejara para la compra de un telescopio, bueno y barato, y este le remitió a Hooke, por considerarlo como el mejor experto en la materia. Entonces Hevelius no sabía que sería en ese terreno donde se produciría el mayor desacuerdo con Hooke.

En respuesta a la petición de Oldenburg, Hooke envió a Hevelius parte de sus reflexiones sobre instrumentos ópticos que estaban contenidas en su *Micrografía*, en la que hace una enconada defensa de la utilización de herramientas que permitan extender y

JOHANNES HEVELIUS



Retrato de Johannes Hevelius realizado en 1677 por el pintor barroco Daniel Schultz (1615-1683), expuesto en la Librería de la Academia de Ciencias Polaca.

El astrónomo Johannes Hevelius (1611-1687), forma latinizada de Jan Heweliusz, nació en Danzig, Polonia. Hasta los diecinueve años estudió en su ciudad natal, donde se inició en matemáticas y astronomía con un profesor particular que despertó en él una fuerte pasión por la observación astronómica y por la elaboración de instrumentos ópticos. En 1630 se trasladó a Holanda para cursar estudios de jurisprudencia, carrera por la que mostró poco interés y que probablemente no finalizó. Después de viajar por Inglaterra y Francia, donde entró en contacto con renombrados astrónomos de la época, volvió a Danzig para dedicarse de pleno a los negocios familiares centrados en la industria cervecera. No volvió a interesarse por la astronomía hasta que en 1639 se produjo un eclipse de Sol que volvió a despertar su vieja pasión por dicha ciencia, actividad que retomó y que ya no dejaría hasta el fin de sus días.

El padre de la topografía lunar

Entre los trabajos de Hevelius destacan sus observaciones sobre las manchas solares, una cartografía muy completa de la superficie lunar que publicó en una de sus más celebradas obras, *Selenographia* (1647), por la que es considerado históricamente como el fundador de la topografía lunar, y el descubrimiento y la descripción de cuatro cometas. Hevelius fue el primero en afirmar que los cometas describen órbitas parabólicas alrededor del Sol. Entre sus obras hay que destacar *Machina coelestis*, un compendio en el que están descritos con detalle todos los instrumentos de que se valía para sus observaciones. Construyó telescopios con longitudes focales de hasta 150 pies y aberturas de 8 pulgadas, pero tenían el inconveniente de que la menor brisa de aire hacía imposible la observación.

mejorar el alcance y la precisión de los sentidos humanos. Como veremos más adelante, esta era una cuestión que iba más allá del sentido común —los grandes telescopios que utilizaba Hevelius

eran inútiles apenas se levantaba un poco de viento—, y para Hooke formaba parte de toda una nueva concepción de la ciencia experimental en la que decía que era necesaria la utilización del «sexto sentido», haciendo referencia con esto a la utilización de dispositivos de observación y medida, cuanto más sofisticados mejor. Hevelius, que probablemente esperaba más la respuesta de un artesano solícito que la de un científico respondón, le agradeció cortésmente las indicaciones que le facilitaba, pero poniendo en tela de juicio la totalidad de su propuesta. Consideraba que todo aquello era pura teoría, algo que en los términos en los que lo planteó podría interpretarse como eufemismo de pura cháchara. La respuesta de Hevelius contenía un reto implícito: él, con sus observaciones a ojo desnudo, alardeaba de haber llegado a medir ángulos hasta los segundos de arco. Algo improbable, pero no imposible.

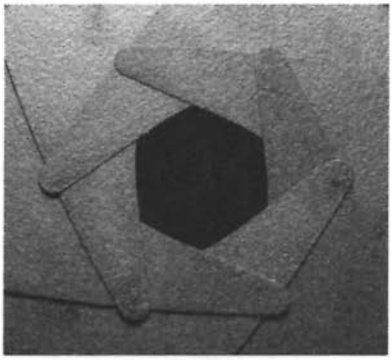
«De nada sirve todo el exquisito cuidado que se emplee para hacer las divisiones de un instrumento más exactas, a menos que el ojo se vea asistido por otras ayudas de lentes ópticos.»

— Robert Hooke.

Hooke hizo entonces un estudio a fondo del *Machina coelestis*, la obra en la que Hevelius describía con detalle su arsenal de instrumentos, y quedó asombrado de la fuerte resistencia que Hevelius mostraba a la utilización de cualquier dispositivo que no tuviera más de cien años de antigüedad, lo que le pareció una auténtica aberración en los tiempos que estaban dando nacimiento a la Nueva Ciencia. Así las cosas, en el mes de septiembre de 1674 Hooke publicó una obra que llevaba el título más largo de todas las que publicaría nunca: «Crítica de la primera parte de la Máquina Celeste del sabio y merecidamente famoso astrónomo Honorable Johannes Hevelius, cónsul de Danzig; junto con una explicación de algunos instrumentos».

El título es una perfecta síntesis del contenido: primero lo enjabona y luego lo machaca, para finalmente hacer un panegírico de su muestrario personal de instrumentos. En esta última parte,

EL DIAFRAGMA IRIS



La aberración esférica es debida a la naturaleza de las lentes y es la responsable de que el conjunto de rayos que inciden paralelamente no acaben convergiendo todos en un mismo punto. Esta aberración aumenta proporcionalmente al cubo del diámetro de la lente, por lo que para corregirla basta con disminuir la longitud de este, aunque al reducir dicho diámetro también se reduce la cantidad de luz. El caso es que en determinadas observaciones puede ser interesante llegar a una solución de compromiso. Disponer de un medio que reduzca dicho diámetro sin necesidad de tener que cambiar la lente puede ser muy útil. Precisamente aquí es donde la inventiva de Hooke se puso de nuevo en juego para crear un ingenioso mecanismo conocido como «diafragma iris», que desde entonces no ha dejado de utilizarse en multitud de dispositivos ópticos. Consiste en un conjunto de láminas articuladas que permiten regular el tamaño de la abertura central, y se coloca entre las lentes del objetivo, de manera que se puede graduar la cantidad de luz que entra.

hace una larga descripción de los nuevos dispositivos que propone, como los cuadrantes, los tornillos y retículas micrométricas o las juntas universales.

La crítica final que le hizo a Hevelius fue ciertamente demoledora. Por mucha atención que pusiera en afinar sus instrumentos, por mucha atención que dedicara a los cálculos, su dispositivo final, que es el ojo humano, tenía una limitación que nunca podría ser superada, ya que viene de fábrica —hoy se sabe que el poder de resolución del ojo humano no puede superar los cincuenta segundos de arco—, y en el mejor de los casos, su indudable agudeza visual no era susceptible de ser transmitida a otros observadores, algo que como veremos se puso de manifiesto cuando Halley intervino para mediar en la polémica. De hecho, cuando Hevelius

falleció, murió el último astrónomo de la historia que hizo observaciones a «ojo abierto».

La respuesta de Hevelius fue un tanto airada. Acusó a Hooke de defender cosas sobre el papel, sin proporcionar datos concretos de sus observaciones, entendiendo, por otro lado, que sus múltiples obligaciones en la Royal Society no le dejaban apenas tiempo para poder trabajar en astronomía, lo que hasta cierto punto era cierto. Y volvía a lanzar el reto, quería que alguien cualificado pudiera testificar la precisión de los datos que él había obtenido con sus métodos de trabajo.

A principios de 1677, la Royal Society, bajo los auspicios del que por entonces era uno de sus peores enemigos, Oldenburg, le dio la espalda a Hooke y le comunicó a Hevelius que la publicación en la que Hooke arremetía contra sus métodos había visto la luz sin su consentimiento y que en absoluto se hacía partícipe de sus opiniones. Incluso iba un poco más allá y reivindicaba la validez de los métodos de Hevelius. Pero esto no fue más que una maniobra política que ponía de manifiesto una vez más la presencia de un elemento como Hooke en el seno de la Royal Society, que siempre le resultó terriblemente incómodo. La disputa no estaba resuelta.

«El universo parece ser infinitamente más grande que lo afirmado hasta ahora por cualquier escritor.»

— Robert Hooke.

Ese mismo año, Oldenburg falleció, circunstancia que la Royal aprovechó para volver a tomar cartas en el asunto. Fue entonces cuando envió al astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742) a Danzig para que llevara a cabo las comprobaciones pertinentes. A pesar de que Hevelius tuvo ocasión de mostrarle las excelencias de su instrumental, con el que le pudo reseñar que era capaz de hacer mediciones de hasta la décima de minuto, Halley no fue capaz de repetirlas. Qué duda cabe de que Halley no tenía tan buena vista como Hevelius. La disputa quedó en tablas, aunque, con el tiempo, la historia acabaría dándole la razón a Hooke.

LAS PLÉYADES Y LA LUNA

Las tres últimas observaciones de la *Micrografía* están dedicadas a la astronomía, aunque la primera utiliza los datos obtenidos para centrarse en un estudio detallado de la naturaleza de la luz.

La observación LIX, que lleva por título «De las estrellas fijas», está dedicada a las Pléyades, un grupo de estrellas de la constelación de Tauro que son visibles a simple vista.

Con su telescopio de doce pies (366 cm), Hooke llegó a distinguir hasta 78 estrellas diferentes, más del doble de la marca que Galileo había establecido con sus 36. Al pie de la lámina que contiene las ilustraciones hace una comparativa de los órdenes de magnitud en función del tamaño y el brillo de las estrellas. Lo que le lleva a plantearse por primera vez el concepto de poder de resolución de un sistema óptico que mide la capacidad que tiene para separar visualmente entre sí dos objetos que, al ser muy distantes, los vemos como uno solo.

La observación LX, que es la última del libro, está dedicada a la Luna y a una reflexión posterior sobre la naturaleza geológica de los volcanes. En ella, Hooke dice que como en la parte derecha de la lámina le había quedado un espacio bastante grande, lo aprovechaba para recrear una ilustración del Mons Olympus, montaña lunar que ya había sido reseñada por Hevelius. Hooke realizó un pequeño paréntesis en el que refiriéndose al término «montaña», decía: «aunque estimo que con cierta impropiedad, pues es un valle».

LOS COMETAS

Hooke hizo observaciones detalladas de un cometa que pudo verse en el hemisferio norte en el invierno de 1664-1665 y también en la aparición de otro cometa muy brillante en 1677, llegando a conclusiones acertadas. Quizá la que más sorprendió entonces fue la posibilidad de que algunos cometas pudieran tener órbitas cerradas, lo que suponía que su aparición en los cielos respon-

diera a un cierto período. De sus observaciones dedujo que el núcleo estaba formado por una masa consistente que era atraída por el Sol, que dicho núcleo estaba en ignición y que su luz no era por tanto el reflejo de la luz del Sol, dato este que corroboraba la ausencia de sombras en el núcleo. Al comparar su luz con la luz de la llama de las velas, que ya había estudiado anteriormente, se dio cuenta de que la combustión tenía lugar sin la presencia del nitro, de lo que dedujo que el éter tenía algún papel fundamental en el proceso de combustión. Esta conjetura también la llevó más adelante al estudio del Sol, pensando que en su proceso de combustión tenían que intervenir otros elementos con una capacidad de combustión mayor. También es interesante la reflexión que hizo sobre la cola de los cometas, cuyo origen creía que está en el propio proceso de erosión de la cola y cuya forma es debida a la repulsión del Sol, concepto que es un antecedente claro de lo que actualmente se entiende por presión de radiación solar.

CAPÍTULO 5

Pionero de la gravitación y el estudio de la luz

La primera de las tristemente célebres controversias que Hooke mantuvo con Newton fue en torno a la naturaleza de la luz. La segunda, la más larga y también la más agria, tuvo como tema central la fuerza de atracción entre los planetas. Ambos temas son trascendentales en la historia de la física. El segundo dio lugar a la famosa ley de la gravitación universal de Newton, mientras que el primero no se resolvió de forma completa hasta principios del siglo XX.

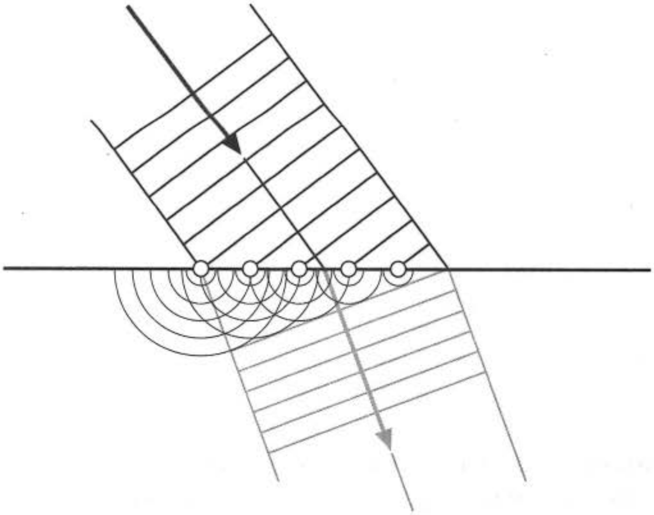
Newton era mecanicista, lo que presupone que todos los fenómenos de la naturaleza tienen o deben tener una explicación mecánica. Esta concepción del mundo, junto con el hecho de que los rayos de luz fueran rectilíneos, llevaron a Newton a conjeturar que la luz estaba formada por partículas, por pequeños corpúsculos, como perdigones, que incidían sobre los objetos materiales, rebotando en ellos, para impactar luego en nuestros ojos. Este planteamiento permitía explicar de manera bastante satisfactoria dos fenómenos, la reflexión y la refracción.

Explicar esto con la teoría corpuscular era una cuestión de choques y rebotes, algo parecido a lo que sucede en una mesa de billar. Si las partículas se encuentran con una superficie puede ser que, dependiendo de la velocidad y de la naturaleza del objeto, las partículas reboten o traspasen la superficie. Si rebotan, se produce una reflexión, y si la atraviesan, una refracción; e incluso es posible encontrar una explicación para que algunas reboten y otras pasen al otro lado.

Pero había otro fenómeno que también pondría a prueba la teoría corpuscular, el conocido en óptica como *difracción* —palabra que induce a pensar en algún tipo de fractura, de división—, que se produce cuando la luz atraviesa una rendija muy estrecha. Se observa entonces que los bordes de la rendija están iluminados. Es como si la luz fuera capaz de bordear obstáculos.

Cuando un frente de ondas incide sobre una superficie, cada punto de esta se convierte en un nuevo emisor de ondas.

FIG. 1



La teoría de Huygens proporcionaba una explicación mucho más satisfactoria al fenómeno de la difracción. Afirmaba que cuando la luz incidía sobre un punto, este se convertía en un nuevo emisor de ondas (figura 1).

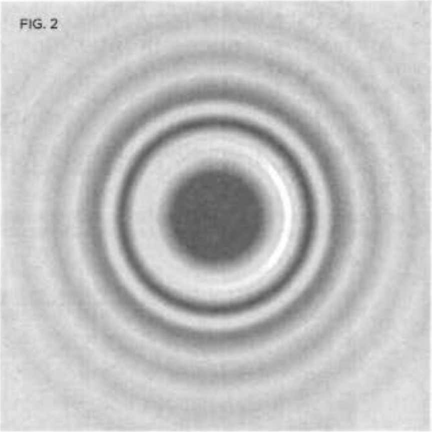
Este resultado, que se conoce actualmente como el «principio de Huygens», afirma que el frente de ondas inicial puede ser considerado como una nueva fuente de ondas que se propagan en todas direcciones, lo que explica que la luz pueda «bordear» obstáculos.

Aun así, la teoría corpuscular de la luz prevaleció sobre la ondulatoria, y es que la teoría de Newton tenía dos bazas ganadoras. La primera era su planteamiento matemático, que le permitió desarrollar una óptica geométrica sólida; y la segunda, de igual peso, fue el incuestionable prestigio de Newton en los círculos científicos de la época.

De todas maneras, se trataba de victorias parciales, ya que además de la difracción había otro misterioso fenómeno en el comportamiento de la luz, el de las interferencias, que no iba a poder ser explicado mediante la teoría corpuscular y que se

puede observar cuando se apoya una lente curva sobre una placa plana de vidrio y se hace pasar luz a través de ella. Se observa entonces la aparición de una serie de anillos concéntricos; unos son luminosos, mientras que los otros son oscuros.

FIG. 2



Dicen que el reconocimiento supremo que se le puede dar a un descubridor es el de la eponimia, con la que se nombra al descubrimiento con el nombre del descubridor. A estos círculos concéntricos de luces y sombras se les llamó «anillos de Newton» (figura 2), porque se atribuye a Newton ser el primero en observar este fenómeno. Sin embargo, como veremos, este es un hecho más a sumar a las injusticias que la historia ha cometido con Hooke.

LA TEORÍA DE HOOKE

Estudiar la trayectoria de una piedra cuando se deja caer o se lanza en un ángulo cualquiera no es una tarea fácil, pero, por lo menos, dentro de ciertos límites, se puede hacer con la piedra lo que se antoje. La luz, en cambio, es mucho más indómita. Para poder experimentar con ella fue necesario crear primero una serie de dispositivos ópticos para atraparla, hacerla ir por donde uno quisiera y realizar mediciones precisas. Este era un terreno en el que Hooke podía jugar con ventaja, especialmente cuando se trataba de dispositivos ópticos.

La mayor parte de sus trabajos sobre la naturaleza de la luz se encuentran expuestos en la *Micrografía*. En la observación IX, *Of the Colours observable in Muscovy Glass, and other thin Bodies* («Acerca de los colores observables en cristales de Moscovia y otros cuerpos delgados»), Hooke explica el experimento consistente en hacer pasar la luz entre dos láminas muy delgadas de

mica entre las que se encuentra una fina película de aire. Observó entonces la aparición de anillos de colores, algo que no sucede cuando el mismo rayo de luz incide sobre una simple placa de mica, de lo que deduce que la aparición de los anillos de luz no es debida a ninguna propiedad específica de la mica, sino a la

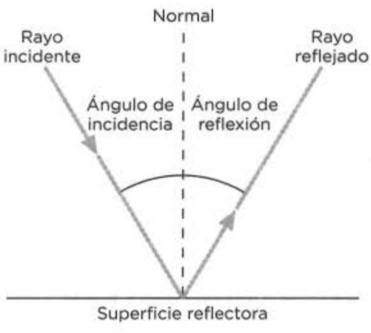
REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

Cuando un rayo de luz incide en una superficie es, en mayor o menor medida, reflejado; de no ser así, no existirían los espejos. Es más, si la luz no se reflejara en absoluto, solo veríamos aquellos cuerpos que poseen luz propia, que es tanto como decir que seríamos prácticamente ciegos. Supongamos que tenemos una superficie reflectora sobre la que proyectamos un rayo de luz incidente en un determinado punto (figura 1). En óptica, a ese rayo se le llama *rayo incidente*. En ese mismo punto en el que incide, podemos trazar una línea imaginaria que sea perpendicular a la superficie en dicho punto. Esta línea imaginaria recibe el nombre de *normal*. También desde ese mismo punto saldrá el que llamaremos *rayo reflejado*.

Las leyes de la reflexión

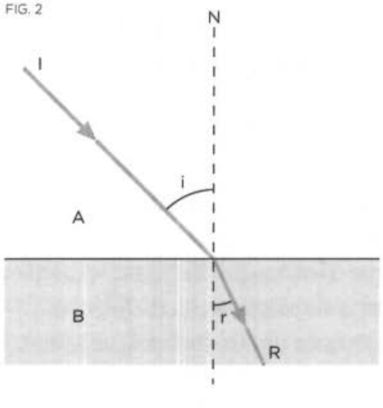
La primera ley de la reflexión afirma que el rayo incidente, el reflejado y la normal están en un mismo plano. La segunda ley garantiza que el ángulo de

FIG. 1



Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflectora, el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales.

FIG. 2



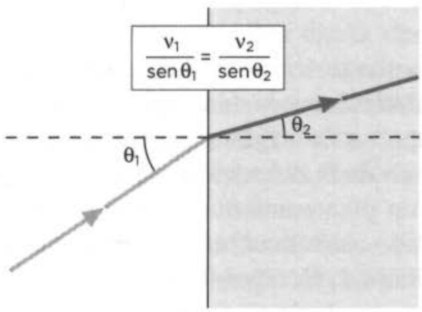
Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro, con diferente índice de refracción, su trayectoria se desvía.

presencia de varias láminas yuxtapuestas. El estudio de Hooke es sumamente detallado y compara los anillos de colores con los de los arcoíris primario y secundario que producen las finas gotas de lluvia cuando se dan las condiciones atmosféricas adecuadas. También llevó a cabo un cálculo de la separación de los anillos

incidencia y el de reflexión son siempre iguales. El otro fenómeno importante, el de la refracción, tiene lugar cuando el rayo incidente atraviesa una superficie o, para ser más precisos, cuando la luz pasa de un medio a otro, desviando su trayectoria (figura 2). Este fenómeno es el responsable de que parezca que un palo está roto cuando parte de él está sumergido en agua (y también de los espejismos en el desierto).

Las leyes de la refracción

La primera ley de la refracción coincide con la de la reflexión, ya que afirma que el rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano. La segunda es algo diferente, ya que lo que hace es establecer una proporcionalidad entre ángulos y velocidades. La velocidad de la luz depende del medio por el que esta se propaga. La velocidad es más baja cuanto más denso sea el medio y viceversa. Este es el motivo por el que cuando, por ejemplo, un rayo entra en el agua se desvía, ya que pasa de un medio poco denso como el aire a otro más denso como el agua. En 1621, Willebrord Snellius, astrónomo y matemático holandés, plasmó de manera precisa la relación que hay entre velocidades y ángulos según la fórmula:



En dicha fórmula, los subíndices hacen referencia a los medios 1 y 2. Las leyes de Snellius son importantes no solo por su valor teórico, sino porque sirvieron de base para la construcción de diversos dispositivos ópticos.

WILLEBRORD SNELLIUS

El matemático y astrónomo holandés Willebrord Snellius (Snell) (1580-1626) publicó varios trabajos interesantes pero, por algún motivo, no se preocupó nunca de publicar los resultados de sus investigaciones sobre óptica. Su conocida ley sobre la refracción fue encontrada entre sus papeles personales una vez hubo fallecido. Lo que sí hizo fue enviar sus resultados experimentales a Huygens y también a Descartes. Este último construyó un desarrollo teórico que permitía demostrar geométricamente la ley de la refracción. En su honor, y gracias a sus tareas como astrónomo, un cráter lunar ha recibido su nombre, Snelius.



que le permitió establecer una relación entre los radios de las circunferencias y los diferentes colores, algo que anteriormente ya había sido observado por Boyle y de lo que Hooke se debió ocupar durante el largo período de tiempo que estuvo trabajando con él.

Sin embargo, como era su costumbre, Hooke no se limitó a hacer observaciones, sino que también conjeturó teorías que fueran capaces de explicar los fenómenos observados. Y es en el fenómeno de la difracción —fue Hooke quien lo bautizó así— que hizo un planteamiento a nivel geométrico que cuestionaba la naturaleza estrictamente rectilínea de los rayos de luz. Estas observaciones fueron publicadas en las obras póstumas en 1666, y en ellas apuntaba la posibilidad de que la luz respondiera en realidad a un movimiento de carácter vibratorio, con una amplitud de vibración que a criterio de Hooke debía ser extremadamente pequeña. Este era un enfoque que chocaba de frente con la teoría corpuscular defendida por Newton.

Una vez decidido que la luz está formada por pequeños pulsos, el problema que se planteó Hooke fue cómo este movimiento ondulatorio se transmite a través del espacio. Estableció entonces la existencia de cuerpos que posean una estructura lo suficientemente uniforme como para que esta propagación no encuentre obstáculos, cuerpos a los que llamó «transparentes», a diferencia de aquellos que inhiben este movimiento, que serían los opacos. Entre estos dos habría una tercera clase de medios que se interpondrían entre la fuente de luz y el ojo, cuya estructura dificultaría en parte la propagación; a estos los llamó «translúcidos».

El siguiente aspecto que consideró fue la capacidad potencial del movimiento para recorrer grandes distancias, como lo hace la luz que nos llega de las estrellas, en una fracción de tiempo extraordinariamente pequeña. Hooke no veía motivos para creer que la velocidad de la luz fuera infinita, es decir, que se tratara de un proceso instantáneo, como se había creído durante mucho tiempo e incluso se mantenía como criterio en su época.

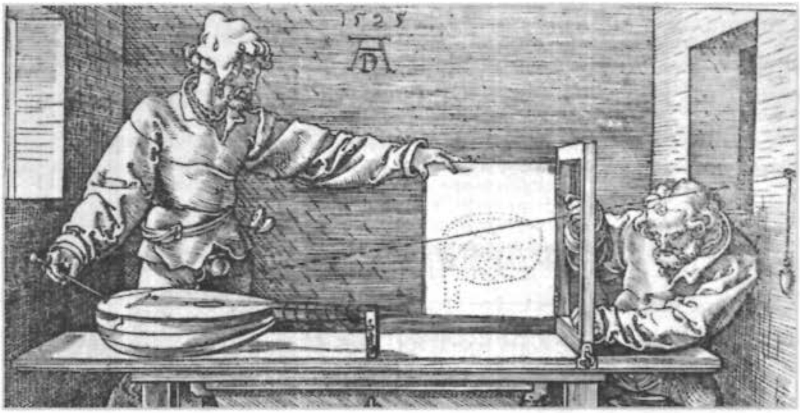
> «Por lo que respecta a la luz, es muy manifiesto que no hay cuerpo luminoso que no tenga sus partes en mayor o menor movimiento.»
>
> — Robert Hooke.

Si se enciende un foco luminoso a una cierta distancia, el tiempo que tarda en llegar hasta nosotros es prácticamente cero. Pero concederle a la luz la cualidad de instantaneidad era tanto como afirmar que la velocidad de la luz era infinita. Se trataba de un serio problema, ya que por aquella época la filosofía y la ciencia todavía no se llevaban bien con el infinito.

La siguiente cuestión que se planteó Hooke fue la que hace referencia al aspecto geométrico de la propagación, basándose en la evidencia de su carácter rectilíneo. Para ello, propuso que el centro emisor de la propagación estuviera en el centro de una esfera, de manera que los rayos de luz se propagaran siguiendo los radios de dicha esfera. Consideró además que en un medio homogéneo la velocidad de transmisión en cualquiera de sus puntos debía ser

LUCES Y SOMBRAS

La observación de las sombras que proyectan los cuerpos dio nacimiento a lo que conocemos como «perspectiva», un tipo de geometría que empezó a desarrollarse de manera sistemática en el Renacimiento de la mano de artistas que también eran geómetras. Percibimos el mundo que nos rodea como tridimensional, pero cuando lo dibujamos en un papel tenemos que ceñirnos a dos dimensiones, que son las que tiene el soporte utilizado. La posibilidad de crear paisajes que den sensación de profundidad o de planos de edificios que sean una representación fiel de sus formas tridimensionales se basó, en sus orígenes, en un juego de luces y sombras. Esto era posible porque se estaba trabajando con líneas rectas, de manera que lo que nadie puso en duda en ningún momento fue que los rayos de luz eran rectilíneos.

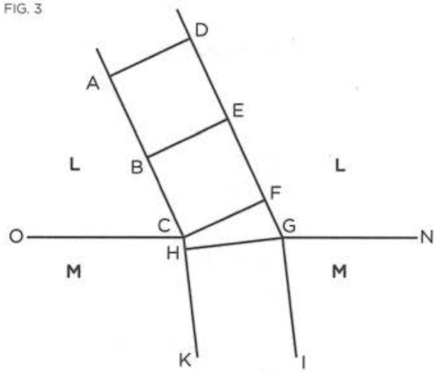


El dibujante del laúd **(1525), xilografía de Alberto Durero publicada en el tratado de geometría y perspectiva *Underwesung der messung*. El dibujante marca los puntos para representar un laúd en escorzo.**

constante. Geométricamente, comparó el fenómeno con el de las ondas que se forman en un estanque cuando se deja caer una piedra. Las ondas van creciendo en círculos concéntricos, hasta que se encuentran con un obstáculo. En este sentido, una piedra tendría el papel de un cuerpo opaco. Este esquema, que ya anticipaba el concepto de frente de ondas, sirvió a Hooke para proporcionar una explicación mecánica del fenómeno de la refracción. Para

ello, analizó lo que sucede cuando un frente de ondas cambia de un medio LL a otro MM.

FIG. 3



Ahí estableció una diferencia sutil cuando hablaba de las diferentes densidades de los medios, ya que no quería referirse a estas teniendo en cuenta cuestiones puramente gravitatorias, en el sentido en que un mismo volumen de uno de los medios tuviera un peso diferente al otro, sino haciendo referencia a una estructura interna que permitiera que la pulsación se transmitiera a diferente velocidad en un medio que en otro, es decir, que en definitiva lo que haga sea afectar directamente a la trayectoria del rayo luminoso. Hooke propuso entonces la figura geométrica mostrada en la figura 3.

«[…] me parece a mí que el intelecto humano está, como su cuerpo, desprovisto de alas, por lo que no se puede trasladar de una estación inferior del conocimiento a otra más alta y sublime si no es paso a paso […]»

— Robert Hooke.

Un cuerpo luminoso lejano emite dos rayos de luz ABC y DEF que avanzan a través de un medio transparente LL. AD, BE y CF son los pequeños impulsos que cortan perpendicularmente a los rayos, y cuando se encuentran con la superficie ON sufren un cambio de velocidad. La idea es que cuando el rayo ABC pasa del medio LL al MM se produce una desviación en la trayectoria. El rayo DEF se mantiene paralelo a él, de manera que cuando llega al punto G, el primero recorre la distancia CH y es de esta forma como tiene lugar la refracción, los rayos CHK y GI se inclinan respecto a los originales.Aunque la manera como Hooke se planteó

LA VELOCIDAD DE LA LUZ



Retrato de James Bradley por Thomas Hudson, conservado en la National Portrait Gallery de Londres.

Medir la velocidad de la luz fue siempre un problema de difícil solución debido a que requiere disponer de dispositivos ópticos de cierta sofisticación. Hasta el siglo XVII, uno de los pocos intentos serios que se habían hecho fue el que llevó a cabo Galileo, con el ingenio que le caracterizaba. Para ello, localizó dos colinas que pudieran verse la una desde la otra y que estaban separadas por una distancia de un kilómetro. Se trataba de que una persona encendiera una luz en la primera colina. El que estaba en la segunda, al recibir la señal luminosa lanzaba al instante un segundo destello. De esta manera, el que estaba en la primera medía el tiempo que tardaba en llegarle la luz cuando el segundo había destapado la linterna. Ese era el tiempo que la luz había tardado en recorrer el camino de ida y vuelta, es decir, 2000 metros. La idea era buena, pero la velocidad de la luz era demasiado elevada para el tiempo de respuesta del cerebro humano. La respuesta a esta cuestión la dio el astrónomo inglés James Bradley (1693-1762), quien en 1726 descubrió un desplazamiento aparente de las estrellas debido al movimiento de la Tierra, lo que le permitió dar una prueba irrefutable de que la velocidad de la luz era finita. La Tierra se mueve, y si la luz viaja a una determinada velocidad, la combinación de ambas cosas da como resultado que haya una diferencia entre la posición en la que observamos una estrella y la que realmente tiene. Este fenómeno, conocido como aberración estelar, fue el que permitió a Bradley medir la velocidad de la luz. Fue una medición bastante precisa para la época: 298000 km/s.

la naturaleza del rayo luminoso pudiera no ser la correcta, en lo que sí estuvo acertado fue en el enfoque geométrico que le dio al frente de ondas. Sin embargo, este planteamiento no resultó ser tan afortunado cuando utilizó el mismo esquema para poder explicar el fenómeno de la iridiscencia, es decir, la descomposición de la luz blanca en los siete colores del arcoíris. En este asunto, Newton le ganó claramente la partida.

Para Hooke, la explicación de la aparición de los colores estaba en la deformación del frente de ondas. La luz blanca era simplemente un conjunto de pulsos perpendiculares a la dirección de propagación. En el momento en que dicho frente se deformaba debido a una refracción, el conjunto de pulsos se fracturaba, dando lugar a la aparición de los colores. El error que cometió Hooke fue considerar que los diferentes colores se correspondían con pulsos de diferente naturaleza, dependiendo del ángulo de inclinación con el que es percibido por la retina, de manera que una determinada fractura en el frente de ondas diera lugar a un tipo de pulso que fuera detectado por la retina como color azul, otro como color rojo, y así hasta completar la gama.

Newton había realizado el experimento en su propio estudio y presentó sus resultados a principios de 1666. En una habitación oscura tenía un pequeño orificio por el que podía entrar un rayo de luz solar. Hacía pasar este rayo a través de un prisma transparente, para luego proyectarlo sobre una pared blanca. Newton llegó a la conclusión de que los colores estaban todos contenidos en la luz blanca, que venían todos empaquetados con ella y que lo que hacía el prisma era separarlos debido a la refracción que se producía entre las caras opuestas del prisma. En definitiva, el poder de refracción del prisma era diferente para cada color. Debido a la gran plaga que asoló Londres en 1666, Newton no presentó sus resultados sobre la dispersión de la luz a la Royal Society hasta cinco años después.

LA CONTROVERSIA SOBRE LA TEORÍA DE LA LUZ

El origen de esta polémica coincide con el envío por parte de Newton de un artículo sobre la dispersión de la luz que remitió a la Royal Society en 1672. Poco antes ya les había hecho llegar un telescopio de su invención para que la Sociedad lo sometiera a juicio de sus expertos.

Por aquel entonces, Newton tenía veintinueve años y nadie en el entorno científico había oído hablar de él. La Royal Socie-

ty reclamó entonces la atención de tres de sus miembros, Boyle, Ward y Hooke; los dos primeros declinaron la invitación aludiendo falta de tiempo, de manera que la responsabilidad de enjuiciar el trabajo de Newton recayó sobre Hooke, a quien tampoco le sobraba el tiempo y que cumplió con la tarea de forma un tanto expeditiva. En aquel momento, Hooke no sabía con quién se las habría de ver.

«Voy a explicar un sistema del mundo que difiere en muchos detalles de cualquiera de los conocidos hasta ahora, respondiendo en todo a las reglas de los movimientos mecánicos.»

— Robert Hooke.

Hooke le dejó muy claro a Newton que los experimentos que le remitía no formaban más que una pequeña parte de todos los que él ya había realizado con anterioridad y además le manifestó su desacuerdo con las conjeturas teóricas que estos le habían sugerido. Hooke se reafirmaba en su teoría expuesta en la *Micrografía* según la cual la aparición de los colores tenía lugar cuando la luz blanca se dispersaba a causa del fenómeno de la refracción, y que nada tenía que ver con una propiedad intrínseca de los supuestos corpúsculos que la formaban.

Por cortesía hacia Newton, la Royal Society retrasó la publicación de esta respuesta, dejando entrever así que se le había dedicado el tiempo suficiente, lo que en realidad no era cierto. Newton respondió brevemente, diciendo que respetaba la opinión de Hooke, pero que no veía que su planteamiento afectara de ninguna manera su hipótesis básica. Prometió dar una respuesta más extensa, cosa que no hubiera hecho de no ser por la insistencia de Oldenburg, siempre ansioso de poder ver a Hooke contra las cuerdas. Dos meses más tarde, Newton se lanzó al ataque mediante un extenso comunicado que rayaba el insulto. En síntesis, le venía a decir a Hooke que la teoría de la luz contenida en la *Micrografía* era un galimatías en el que nadie podía entender nada y que los comentarios que había hecho a su trabajo

denotaban ciertamente falta de tiempo y dedicación, ya que evidenciaban que no había sido capaz de comprenderlos en toda su magnitud.

Llegados a este punto, la Royal Society cometió una falta de corrección que marcaría una pauta a seguir en sus relaciones con Hooke. No solo le faltó tiempo para publicar la respuesta de Newton en las *Philosophical Transactions*, sino que además dejó a Hooke sin oportunidad de réplica. Hooke no solo se sintió traicionado por Oldenburg, con el que ya a partir de entonces mantendría para siempre una postura beligerante, sino también por el resto de los miembros de la Royal Society, que habían aprovechado la oportunidad para humillar a uno de sus miembros más antiguos frente a un total desconocido.

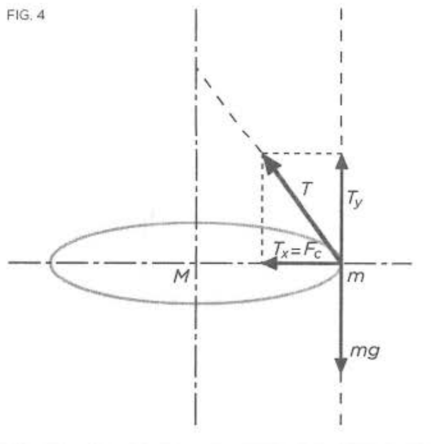
LA TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN

Mediante los experimentos que Hooke llevó a cabo con el péndulo cónico llegó a una conclusión de una enorme importancia en la historia de la dinámica, ya que conduce directamente a la ley de la gravitación universal que Newton establecería años más tarde y que acabaría siendo el tema central de la segunda confrontación con Newton.

Como ya se ha expuesto en el capítulo 3, el péndulo cónico es muy similar al péndulo simple, en tanto que se trata de una masa puntual suspendida mediante un hilo inextensible. La diferencia es que en el péndulo cónico la oscilación no se produce en un plano, sino que se imprime a la masa un movimiento circular, de manera que mientras esta describe una circunferencia, el hilo lo hace siguiendo la generatriz de un cono, de ahí el nombre de péndulo «cónico».

Si se imprime al péndulo un impulso tangencial cuya dirección esté contenida en un plano perpendicular al de oscilación, el péndulo describe una curva cerrada cuya naturaleza dependerá de la fuerza. Puede ser una circunferencia o una elipse, pero en cualquier caso, recuerda al movimiento de los planetas al-

FIG. 4



Esquema del péndulo cónico que sugirió a Hooke la ley de la gravitación universal, en el que puede verse la componente horizontal de la tensión T_x, que equivale a la fuerza centrípeta $T_x = F_c$. En el caso de un astro de masa *m* orbitando alrededor de un astro central de masa *M*, la F_c es igual a la fuerza de atracción entre ambas masas.

rededor del Sol. Hooke explotó esta analogía hasta sus últimas consecuencias.

Como se muestra en la figura 4, la masa *m* del péndulo se ve sometida al peso. Una componente de este es equilibrada por la cuerda y la otra es la que la impulsa hacia el centro de la órbita en la que está girando. Pero los planetas no cuelgan de ninguna cuerda, ni tampoco tienen la fuerza de un peso dirigido hacia abajo. Hooke concluyó que la fuerza central que estaba actuando sobre la masa tenía que proceder de algún tipo de atracción que el centro ejerciera sobre esta.

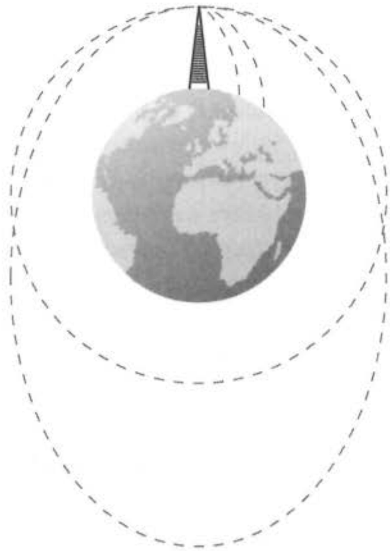
Suponiendo una órbita circular, la masa *m* posee una velocidad inercial, aquella que ya le es propia —en un lenguaje más preciso, hablaríamos simplemente de una velocidad inicial—, que podemos representar por un vector situado en el plano de la órbita y tangente a esta en cada punto de la trayectoria. Se trata de una velocidad constante.

Por otro lado, el sistema anterior equivaldría al de una supuesta masa *M* situada en el centro de la circunferencia que ejercería una fuerza de atracción sobre la masa orbitante *m*, que la obligaría a seguir constantemente una trayectoria circular. Hay que tener en cuenta que en la época en que Hooke hizo estas reflexiones, la conjetura de que las masas se atraen debido a una fuerza que se ejerce a distancia no estaba exenta de una gran audacia. El considerar que el movimiento de los planetas alrededor del Sol era debido a la atracción que este ejercía sobre ellos, convirtió a Hooke en el pionero de lo que más tarde se conocería como la ley de la gravitación universal.

No cabe duda de que Newton conocía los resultados a los que Hooke había llegado experimentando con el péndulo cónico, ya que estos resultados, que deben considerarse entre los más importantes de la carrera científica de Hooke, aparecen en

ÓRBITAS

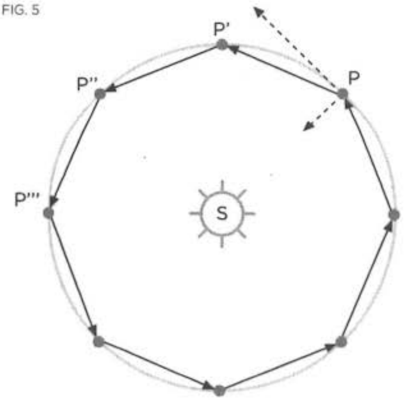
Supongamos que estamos en lo alto de una torre con una piedra en la mano. Si dejamos caer la piedra, esta seguirá una trayectoria rectilínea en caída libre hasta llegar al suelo. En cambio, si la lanzamos con fuerza hacia delante, describirá una parábola, de mayor o menor alcance según la fuerza con la que hayamos impulsado la piedra. Si tuviéramos los extraordinarios poderes de un superhéroe y estuviéramos en la cima del Everest, podríamos lanzarla con tal fuerza que no cayera al suelo, sino que estuviera cayendo todo el rato, describiendo una órbita alrededor de la Tierra. Visto así, un satélite artificial es un objeto que está cayendo continuamente, en el sentido de que no se encuentra en equilibrio, sino que se ve sometido a la fuerza gravitatoria que actúa como fuerza centrípeta obligándole a seguir una trayectoria curvilínea. Si la velocidad con que lanzamos la piedra es de 11,2 km/s, llamada «velocidad de escape», la piedra saldrá del campo gravitatorio terrestre y entrará en una órbita parabólica o hiperbólica. A 7,7 km/s describirá una órbita circular, y a velocidades comprendidas entre 7,7 km/s y 11,2 km/s describirá órbitas elípticas. En las órbitas cerradas, circulares o elípticas, la velocidad con que se mueve el objeto depende de la altura de la órbita: cuanta más elevada es, menor eș la velocidad. Hay una altura en la que la velocidad orbital coincide con la velocidad de rotación de la Tierra; son las llamadas órbitas geosincrónicas o geoestacionarias.



Un cuerpo lanzado a una determinada altura sobre la superficie terrestre describe diferentes órbitas en función de la velocidad que se imprima a dicho cuerpo. En general, los satélites de comunicaciones describen órbitas geoestacionarias, ya que les permiten estar siempre alineados con la misma posición terrestre y, por tanto, no es necesario ir reorientando la antena.

dos publicaciones, la primera de ellas en un artículo presentado a la Royal Society en 1666 que llevaba por título «Inflexión de un movimiento directo en uno curvo por la intervención de un

FIG. 5



principio atractivo». El segundo artículo publicado, aparecido mucho más tarde, en 1674, e incluido en la primera de las conferencias cutlerianas, llevaba por título: «Un intento de demostrar el movimiento de la Tierra mediante observaciones». En ambas publicaciones se encuentran explicadas con detalle lo que pueden considerarse las bases para la mecánica celeste que más tarde desarrollaría Newton.

En la figura 5, el planeta se ve sometido en cada uno de los puntos P, P', P'',... a un impulso instantáneo que lo dirige hacia el Sol (S). A cada nuevo impulso queda modificada la dirección del movimiento inercial del planeta, y el resultado de la acción de todos ellos es un movimiento a lo largo del perímetro de un polígono. Incrementando el número de puntos en los que el planeta es empujado hacia el centro, crece el número de lados del polígono. En el límite, la acción permanente de una fuerza central atractiva produce una órbita circular.

Es cierto que Newton tenía el instrumental matemático necesario —del que Hooke carecía— para hacer una formulación correcta que expresara cómo dos masas separadas por una determinada distancia se atraen y poder explicar satisfactoriamente mediante esta nueva teoría el cumplimiento de las leyes de Kepler.

LA VIS CENTRÍPETA

En los *Principia*, a modo de prólogo, Newton establece un conjunto de definiciones, leyes y axiomas que luego utilizará para desarrollar sus teorías. La fuerza centrípeta aparece en la definición V, a la que denomina «vis centrípeta», que es como la bautizaron Hooke y Huygens. Newton utiliza como ejemplo el movimiento

que se le imprime a una piedra mediante la honda y la descripción que hace de la trayectoria de la piedra, además de ser de una gran precisión, es todo un alarde de intuición.

En la sección VI del libro segundo de los *Principia*, desde el teorema XIX hasta el XXIII es manifiesta la utilización del péndulo por parte de Newton para desarrollar dos hitos fundamentales de la física. El primero de ellos es la separación entre el concepto de masa y el de peso de un cuerpo. El segundo es una aproximación matemática al concepto de aceleración centrípeta de cuerpos que siguen en general trayectorias curvas. El teorema XIX afirma, concretamente:

> Las cantidades de materia de los cuerpos pendulares cuyos centros de oscilación se encuentran a igual distancia del centro de la suspensión están en razón compuesta de la razón de los pesos y el cuadrado de la razón de los tiempos de las oscilaciones en el vacío.

En el enunciado de este teorema y el de los siete corolarios que se desprenden de él, Newton utiliza las técnicas que previamente, tanto Hooke como Huygens, ya habían utilizado en el péndulo cónico, para establecer la formulación de la ley de la gravedad y la posible utilización del péndulo como dispositivo para medir el valor de la gravedad en diferentes lugares de la Tierra.

Hay que tener en cuenta que antes de que Newton publicara sus resultados finales sobre la gravitación, se consideraba que un cuerpo que siguiera una órbita circular estaba en una posición de equilibrio, en la que entraban a formar parte dos fuerzas iguales y de sentido contrario, que eran la fuerza centrífuga y una supuesta fuerza de atracción hacia el centro que, en el caso de los planetas, debía ser ejercida por el Sol.

Hooke tuvo un golpe de intuición genial cuando afirmó que ese no era un estado de equilibrio, ya que de ser así, el cuerpo continuaría su trayectoria rectilínea a velocidad constante. Es precisamente el desequilibrio lo que curva el movimiento. La presencia de una única fuerza dirigida hacia el centro es lo que determina el movimiento circular. El cuerpo no está en equilibrio,

tanto es así que lo que en realidad hace es «caer» constantemente hacia el centro.

«El entendimiento ha de ordenar todos los servicios inferiores de las facultades más bajas, pero no ha de hacerlo como un tirano, sino como un patrón legal.»

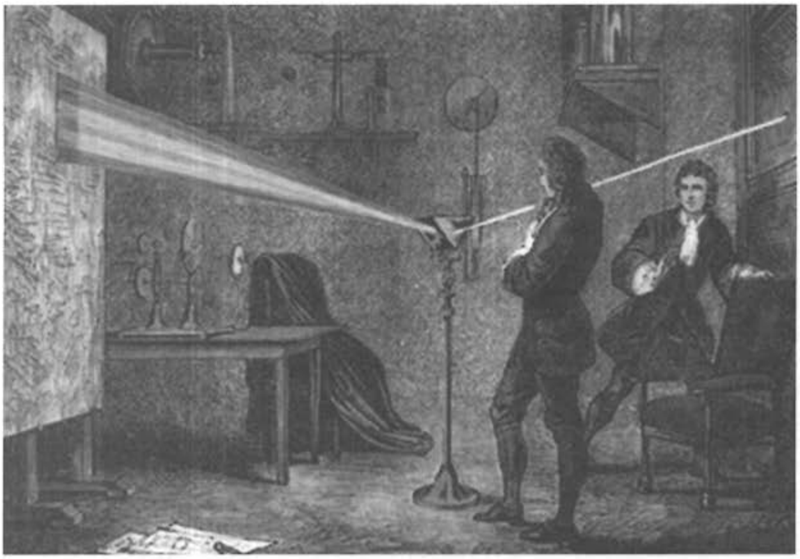
— Robert Hooke.

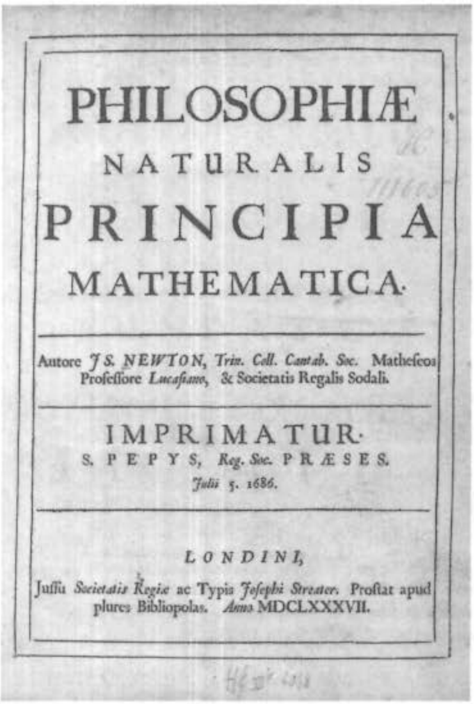
En una de las cartas que Hooke envió a Newton dice explícitamente, aunque en un lenguaje muy engorroso, que «la atracción se halla siempre en una proporción doble a la distancia del centro recíproco», con lo cual estaba diciendo que la fuerza de atracción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, que es lo que afirma, ni más ni menos, la ley de la gravitación universal de Newton. Es justo pues que Hooke le reclamara a Newton que al menos reconociera que sus escritos le habían servido de guía.

LA CONTROVERSIA SOBRE LA TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN

En 1679, Hooke era secretario de la Royal Society, y como tal pidió a Newton que reanudara su comunicación con la Sociedad enviando a la misma algún artículo científico que considerara de interés. De paso, aprovechó para pedir disculpas por los encontronazos anteriores. Consideró que los hombres de ciencia debían dejar a un lado cuestiones puramente personales para centrarse únicamente en el objeto de su trabajo. También aprovechó la misiva para pedirle su opinión sobre las teorías que había desarrollado sobre el movimiento de los cuerpos celestes y las causas que los originaban. Obviamente, en este último punto se escondía una bomba de relojería.

En un principio, Newton declinó la invitación. Vino a decir que en ese momento el tema no le interesaba —concretamente,





PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore *J S.* NEWTON, *Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheſeos Profeſſore *Lucaſiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,

Juſſu *Societatis Regiæ* ac Typis *Joſephi Streater.* Proſtat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.



FOTO SUPERIOR:
Tras varios experimentos, en 1666 Newton demostró que todos los colores estaban contenidos en la luz blanca. Consiguió llegar a esa conclusión haciendo pasar un rayo de luz a través de un prisma transparente. Newton afirmaba que la luz se propaga en línea recta, mientras que Hooke apuntó a que este fenómeno era de carácter vibratorio.

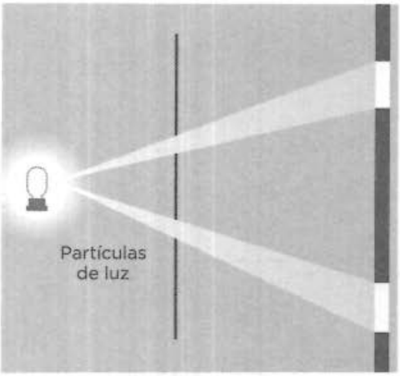
FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Portada de la primera edición de los *Principia* de Newton, de 1687. En ellos postuló, entre otras, la ley de la gravitación universal. Sin embargo, Hooke había formulado antes que Newton muchos de los fundamentos de la teoría de la gravitación, algo que sin duda estimuló las investigaciones de Newton sobre la naturaleza de la luz.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Vitral en memoria de Hooke, conservado hasta 1992 en la iglesia de Santa Elena, en Londres. En abril de ese año, un atentado terrorista en las cercanías de la iglesia lo destruyó.

EL EXPERIMENTO DE YOUNG

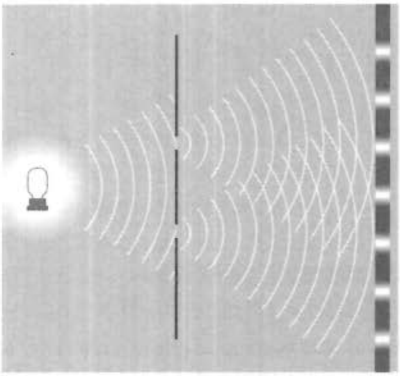
Entre 1797 y 1799, el científico inglés Thomas Young (1773-1829) llevó a cabo un experimento revolucionario que desbancaría la teoría corpuscular de Newton y revalidaría la ondulatoria de Huygens. Young hizo pasar luz solar a través de una delgada rendija, obteniendo un rayo de luz. Luego dirigió el rayo hacia una lámina en la que había dos rendijas muy estrechas y muy cerca la una de la otra. Por último, proyectó el resultado en una pantalla. Si creemos que la luz está formada por partículas, lo que esperamos ver en la pantalla son dos columnas luminosas formadas por los impactos correspondientes de las partículas que han pasado por cada una de las rendijas (figura 1). Pero no fue esto lo que sucedió en el experimento de Young; en la pantalla aparecieron una serie de franjas oscuras que se alternaban con franjas luminosas. La explicación de este experimento requirió rescatar el principio de Huygens, según el cual cuando un punto recibe una onda luminosa se convierte en un nuevo foco emisor de luz. De esta forma, de cada una de las rendijas saldrá un nuevo frente de ondas que avanzará hacia la pantalla (figura 2). Sucede que cuando dos ondas cruzan sus caminos se producen interferencias. Técnicamente las interferencias son algo complicadas, pero la idea es muy simple, sobre todo si visualizamos las ondas como funciones sinusoidales.

FIG. 1



Si la luz estuviera formada por partículas, al atravesar una pared con una doble rendija sería de esperar que la imagen resultante estuviera formada por dos franjas de luz claramente diferenciadas.

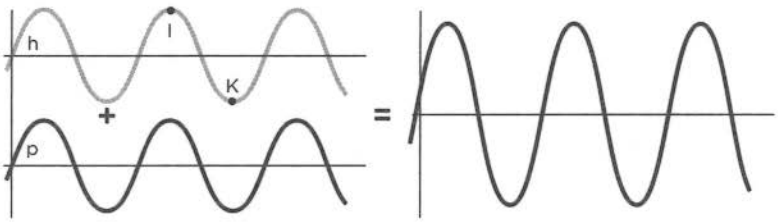
FIG. 2



El experimento de Young muestra que cuando la luz procedente de un único foco atraviesa una doble rendija, la imagen resultante está formada por varias franjas de luces y sombras.

Por ejemplo: las dos ondas h y p de la figura 3 están en fase, de manera que cuando se encuentran, el valor en la cresta (en el punto I) se duplica, lo mismo ocurre en el valle (punto K). El resultado es una onda de «doble tamaño» que la original. Es lo que se conoce como interferencia constructiva.

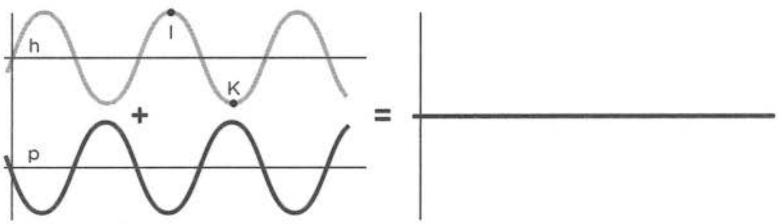
FIG. 3



Ondas en fase.

Si, en cambio, como se muestra en la figura 4, las dos ondas se encuentran en oposición de fase, es fácil comprender que se anularán y el resultado de sumar las dos ondas h y p sería una línea recta.

FIG. 4



Ondas en oposición de fase.

Esto es lo que sucede en el experimento de la doble rendija: cuando la interferencia es constructiva, en la pantalla se produce la correspondiente franja de luz; en cambio, cuando es destructiva aparece una zona oscura. Este experimento, que fue presentado por Thomas Young en la Royal Society, asestó un golpe definitivo a la teoría corpuscular de Newton —teniendo en cuenta que en el ámbito científico siempre resulta arriesgado decir que algo es definitivo—.

dijo que se había alejado de la filosofía— y que estaba centrado en otros asuntos para él de mayor interés. Además, añadía que desconocía la teoría a la que se refería Hooke, ya que no había leído nada sobre el asunto. En esto último, probablemente mintió, ya que en años anteriores había tenido acceso en más de una ocasión a los trabajos que tanto Hooke como Huygens habían publicado en la Royal Society.

El rechazo de Newton fue formalmente cortés, pero es obvio que escondía cierta agresividad. Luego, decidió enviar un trabajo en el que analizaba la caída de un cuerpo relacionándolo con el movimiento de rotación de la Tierra. En él, cometió un error al describir la curva que seguía el cuerpo y Hooke se lo corrigió, no una, sino dos veces. Newton se encerró entonces en un mutismo total y pasó dos años de retiro voluntario para escribir la que sería su obra más importante, que relegaría definitivamente a Hooke a un segundo plano, *Philosophiae naturalis principia mathematica* («Principios matemáticos de la filosofía natural»), también conocido como los *Principia*, publicados el 5 de julio de 1687 a instancias de Edmond Halley.

En síntesis, la situación era que Newton había publicado una obra maestra en la que había puesto todo su saber matemático. Entre otras cosas, era capaz de demostrar que se cumplían las leyes de Kepler, algo que hasta ese momento nadie había hecho. Inglaterra necesitaba en aquel entonces de una figura como Newton para mostrar que había alcanzado un nivel científico equiparable o superior al del resto de países del continente, y la sociedad científica a la que Newton pertenecía, representada por la Royal Society, hizo todo lo posible para que así fuera, eliminando cualquier obstáculo que se interpusiera en su camino. En este tipo de escenarios, el tema de las autorías es siempre el más delicado. Este es el motivo por el que un personaje como Hooke acabó siendo terriblemente incómodo para todos.

Hooke reconoció todos y cada uno de los méritos de Newton. Lo único que reclamaba era el reconocimiento por parte de este de que sus trabajos le sirvieron al menos de inspiración y esperaba que en el prólogo de los *Principia* se hiciera mención a su nombre. En esta ocasión, volvió a sentirse traicionado por todos

los miembros de la Sociedad, que en el mejor de los casos se limitaron a ignorarle.

Como muestra de los niveles de mezquindad que alcanzó la disputa, basta mencionar que Newton llegó a acusar a Hooke de que había aprovechado el fallecimiento de su madre para acuciar aún más las críticas, sabiendo que de esta forma entorpecería su trabajo.

CAPÍTULO 6

Arquitecto y geólogo

Las facetas del Hooke arquitecto y geólogo pueden resultar sorprendentes para aquellos que no conocen su biografía. En la primera, destacó construyendo edificios singulares que marcaron un estilo, además de aportar un descubrimiento técnico como fue el arco catenario. En la segunda, se adelantó a los tiempos al plantear, gracias a sus observaciones sobre fósiles, lo que acabaría llevando a la teoría de la evolución de las especies.

Dos años después de que Hooke fuera nombrado *curator* de la Royal Society, encontró en sir John Cutler (1607-1693) a un mecenas de la ciencia dispuesto a ayudarle. Cutler era un conocido y respetado comerciante que se propuso estimular la investigación científica financiando una serie de conferencias sobre diferentes temas. Su objetivo era mejorar el comercio, tanto en las comunicaciones como en su propia organización interna. Por otro lado, la iniciativa también abrigaba ciertos intereses económicos, ya que podría tener opción sobre los derechos de las patentes de cualquier nuevo dispositivo que pudiera tener una posible aplicación práctica. El caso es que Hooke aceptó la responsabilidad de trabajar en dichas conferencias, pero debido a que su campo de investigación se alejaba bastante de los intereses de Cutler, en más de una ocasión tuvo problemas con las retribuciones económicas, de manera que Cutler no solo se retrasó en los pagos, sino que incluso dejó a deberle dinero. Aun así, Hooke le rindió un cierto homenaje cuando en 1679 publicó un libro en el que estaban reunidos sus trabajos científicos de los últimos quince años y al que puso por título *Conferencias cutlerianas*. En la introducción, Hooke escribió a modo de prólogo:

> Vemos, por tanto, la necesidad de unir el conocimiento físico y filosófico con el mecánico y experimental; cuán pobre e imperfecto se

demuestra el estudio de la técnica si no se le añade el de la naturaleza, y qué decisión tan racional adoptó sir John Cutler, patrocinador y fundador de estas conferencias, al unir la contemplación de ambas.

En dicho prólogo, Hooke dejaba claro que, a pesar de haber sido financiado con otro propósito, iba a destinar el proyecto al ámbito estrictamente científico, haciendo partícipe de ello a Cutler, aunque esa no fuera su intención original. En el fondo, se trataba de mantener el delicado equilibrio que ha habido siempre entre la financiación privada y la pública en lo que respecta a la investigación científica. No hay que olvidar que Hooke fue uno de los primeros científicos de la historia que recibió un sueldo por parte de una institución académica por dedicar parte de su tiempo a la investigación. Hooke era consciente de que los resultados de sus investigaciones debían por tanto reportar algún tipo de beneficio social y se hizo eco de ello con frecuencia, dejándolo claro explícitamente en la mayoría de sus escritos, especialmente en las *Conferencias cutlerianas*.

En el libro aparecen un total de seis conferencias. De las que contienen los temas científicos más importantes hemos hecho una exposición detallada en capítulos anteriores. Los títulos y temas de las conferencias son los siguientes:

1. *Un intento de demostrar el movimiento de la Tierra mediante observaciones*, conferencia en la que plantea el estudio de las paralajes, de la magnitud de las estrellas, pero sobre todo del «Sistema del Mundo», en el que se considera por primera vez la presencia de una fuerza centrípeta responsable de las trayectorias curvas y que le lleva a conjeturar lo que luego será la ley de la gravitación universal.

2. *Crítica de la primera parte de la Máquina Celeste del sabio y merecidamente famoso astrónomo Honorable Johannes Hevelius, cónsul de Danzig; junto con una explicación de algunos instrumentos*, crítica de la que ya se ha hablado en el capítulo 4.

3. *Una descripción del helioscopio y de otros instrumentos*, en la que se describen las mejoras introducidas por Hooke en los telescopios, la articulación universal y el escape como mecanismo fundamental de los relojes —contexto en el que aprovecha para reclamar su autoría—. También da una descripción detallada del helioscopio, instrumento de su invención que sirve para hacer observaciones del Sol sin dañar la vista.

4. *Descripción de algunas mejoras mecánicas en lámparas y balanzas hidrostáticas*. Aquí Hooke toca temas tan diversos como la balanza hidrostática, las manchas solares o los perfeccionamientos de las lámparas. A este último tema le dedica una atención especial. En aquella época, para el alumbrado, tanto público como privado, no se disponía de otro recurso que no fueran las velas o las lámparas de aceite. Hooke propone una serie de mejoras para hacer estos dispositivos más seguros y eficaces.

5. *Conferencias y recopilación de trabajos efectuados por Robert Hooke, secretario de la Royal Society, que consta de dos partes, Cometas y Microscopium*. En la parte dedicada a los cometas, hace un estudio de la composición y trayectorias de los mismos, y en la segunda parte plantea mejoras en el microscópico, especialmente en las técnicas de iluminación. También da muestras de observaciones de seres vivos (protozoos) haciendo un cálculo estimativo de sus tamaños.

6. *De potentia restitutiva, o sobre los resortes que explican el poder de los cuerpos elásticos*, donde aparece expuesta con todo lujo de detalles la ley de Hooke relativa a los resortes, al dinamómetro y a un estudio general sobre la elasticidad, que incluye a los gases.

Después de la *Micrografía*, las *Conferencias cutlerianas* fueron la segunda publicación de Hooke en orden de importan-

cia. La mayoría de los artículos que escribió después no fueron publicados en vida y se encontraron entre sus pertenencias personales. Lo que se puede afirmar sin duda es que estas conferencias ayudaron a consolidarle un prestigio como científico, que sus coetáneos, a pesar de sus incesantes intentos por sepultarlo en el anonimato, tuvieron que acabar reconociendo, considerando a Hooke como «el mayor de los maestros de las invenciones mecánicas en el mundo».

«Cuán pobre e imperfecto se muestra el estudio de la técnica si no se le añade el de la naturaleza.»

— Robert Hooke.

Pero lo que este reconocimiento no mejoraba era la posición económica de Hooke. Aunque oficialmente el cargo de *curator* no comportaba ningún tipo de compensación económica, la Royal Society acordó con Hooke una remuneración de treinta libras anuales y el poder disponer gratuitamente de un alojamiento en el Gresham College. En 1665, se le concedió la plaza de profesor de Geometría en dicha institución, lo que suponía un salario adicional de cincuenta libras anuales. Teniendo en cuenta los salarios medios de la época y a pesar de que disponía de alojamiento gratuito, la posición económica de Hooke no era ni mucho menos equiparable a la de sus colegas, sobre todo si se tiene en cuenta que nadie le pagaba puntualmente; la Royal Society, porque desde su fundación había tenido problemas para atender a sus pagos, y el señor Cutler, porque tuvo que recurrir a donaciones para poder atender los suyos. Al final, Hooke se vio obligado a recurrir a los tribunales para poder cobrar todo lo que Cutler le debía.

La situación económica de Hooke no se consolidó hasta que empezó a trabajar como arquitecto. Solo por los honorarios percibidos por la reconstrucción de las iglesias superó el sueldo de la Royal Society de cuarenta años de trabajo. Se calcula que si a lo largo de su vida ganó 4000 libras por su actividad científica, fueron 7500 las que ganó como arquitecto en la reconstrucción de Londres tras el gran incendio de 1666.

ROBERT HOOKE, EL ARQUITECTO

Poco después de la medianoche del domingo 2 de septiembre de 1666, Thomas Farynor terminó su trabajo y se fue a dormir. Era panadero y había preparado la hornada que debía vender al día siguiente. Su panadería estaba en Pudding Lanen, una calle de la actual City de Londres. Aquella noche cometió un grave error, sin duda el peor de su vida. Se dejó encendido el horno, y mientras él dormía en el piso superior con su familia, las brasas prendieron la leña que estaba apilada junto al horno. Al cabo de poco rato, la planta baja era pasto de las llamas. Toda la familia logró escapar saliendo por la claraboya del tejado, pero una sirvienta quedó atrapada y murió, probablemente asfixiada por el humo. Luego, entre todos los vecinos intentaron sofocar el fuego que se estaba extendiendo con rapidez a las casas colindantes. Pasada una hora, se dieron cuenta de que sus esfuerzos eran inútiles. En aquel barrio, como en la mayoría de los barrios de Londres, las casas estaban construidas a base de madera y paja prensada, materiales resecos como consecuencia de dos largos años de sequía. A esto había que sumar que las calles eran demasiado estrechas para formar cadenas humanas con baldes de agua. Si no querían que la cosa fuera a mayores, no quedaba otra solución que empezar a derribar edificios para crear cortafuegos. Los propietarios se opusieron y las llamas siguieron avanzando hacia los depósitos de papel y diverso material inflamable que se encontraba almacenado a las orillas del río. Empezó a soplar un fuerte viento del oeste que acabaría siendo un vendaval. Alguien con la autoridad suficiente tenía que ordenar que dieran comienzo las demoliciones. La única persona que podía hacerlo era el alcalde de la ciudad, sir Thomas Bloodworth, pero no lo hizo. Adujo para ello que la mayoría de los propietarios de aquellos almacenes no estaban allí para autorizar la demolición. Cuando fue presionado por el cuerpo de bomberos, volvió al lugar de los hechos para reconsiderar la situación y emitió un juicio que ha pasado a la historia: «¡Pish! Una mujer podría orinar encima», y se volvió por donde había llegado. Así dio comienzo una de las mayores calamidades de la historia de Londres.

La ciudad estuvo ardiendo durante tres días. El fuego se extendió sobre 2025000 m^2, consumiendo por completo 400 calles, 13200 viviendas, 89 iglesias, cuatro puertas de las murallas, el ayuntamiento, cuatro puentes, 44 salones de la Livery Company, la Royal Exchange, la casa de aduanas y la catedral de San Pablo, entre otros. Y dejó a más de 80000 personas sin hogar. El número de víctimas mortales nunca se ha sabido.

Estos datos figuran en una inscripción que está en la cara norte de un famoso monumento que se erigió en memoria del gran incendio, diseñado y construido por Robert Hooke y Christopher Wren. Se trata de una columna dórica de 61 m que todavía existe y que se encuentra junto al lugar en el que se originó el incendio.

LA RESTAURACIÓN

El incendio había sido devastador. No había daños subsanables. Se tenía que empezar todo de nuevo, lo que iba a requerir de un proyecto urbanístico y de las personas que se hicieran cargo de él y de su consecución. Esta ingente tarea recayó sobre dos de los miembros del Colegio Invisible: Christopher Wren y Robert Hooke.

Se presentaron seis proyectos de reconstrucción al rey Carlos II. Uno de ellos era de Hooke, pero es un documento desaparecido y lo único que se sabe de él es que respondía a una configuración geométrica en forma de retícula. Hubiera sido interesante conocer con detalle la idea que Hooke tenía de lo que debía ser una ciudad moderna. El primer proyecto que presentó Wren también tenía características innovadoras, pero se desestimó porque suponía un trazado nuevo y la intención era aprovechar los cimientos todavía humeantes que quedaban como únicos testigos de la vieja ciudad. Este es uno de los motivos por los que el Londres actual todavía tiene ciertos tintes medievales.

Wren presentó entonces un proyecto siguiendo las nuevas directrices impuestas por la Corona que fue el que definitivamente se aprobó. Hubo algunos cambios radicales como la amplitud mejorada de las calles, la altura de los edificios que no debían

superar las tres plantas y sobre todo, la utilización de piedra y ladrillo en sustitución de la madera y la paja. No solo había que construir barrios enteros de viviendas, sino también almacenes y oficinas que devolvieran la actividad comercial a la ciudad; estas últimas construcciones tuvieron prioridad. Y también estaban los grandes edificios singulares, como el Real Colegio de Médicos, Montagu House —actual Museo Británico—, el Observatorio de Greenwich o la catedral de San Pablo.

CHRISTOPHER WREN



Christopher Wren en un óleo de Godfrey Kneller de 1711. National Portrait Gallery, Londres, Inglaterra.

Hijo de una familia acomodada y en buenas relaciones con el rey Carlos II, Christopher Wren (1632-1723) nació en el condado de Wiltshire, en el suroeste de Inglaterra, del que su padre era rector. Recibió una herencia importante que le permitió vivir holgadamente toda su vida. Wren realizó sus primeros estudios en la Westminster School, dirigida en aquel tiempo por el doctor Richard Busby y a la que también asistió Hooke. Fue profesor de Astronomía en el Gresham College y uno de los miembros fundadores de la Royal Society. Destacó como científico, especialmente como matemático y astrónomo. Entre sus aficiones estaba la pintura, en la que destacaba como un dibujante notable. Tras el gran incendio de Londres, fue nombrado director de la reconstrucción participando en el diseño de numerosos edificios, como la biblioteca del Trinity College, en Cambridge, el complejo de Greenwich con el Observatorio Real y el Hospital Real. Entre todos ellos, cabe destacar la construcción de la catedral de San Pablo, combinación de formas clásicas y barrocas que caracterizó a la mayoría de los edificios por él diseñados en el Londres monumental. Hasta 1702 fue Gran Maestre de la masonería inglesa. Wren murió en 1723, cuando se encontraba trabajando en la reconstrucción del palacio Tudor de Hampton Court.

Una comisión especialmente constituida para el proyecto eligió a Wren como director general de la reconstrucción y a Hooke como inspector urbanístico de la ciudad, muy probablemente por recomendación de John Wilkins. Esta colaboración entre Wren y Hooke duró más de treinta años. Después, Wren fue relevado de sus cargos académicos para dedicarse plenamente a la tarea de la reconstrucción. Ese no fue el caso de Hooke, que teóricamente trabajaba a tiempo parcial, ya que debía seguir atendiendo a sus obligaciones como *curator* en la Royal Society.

Como inspector, Hooke debía velar por la seguridad de los nuevos edificios para asegurarse de que todas las medidas contraincendios se llevaban a cabo con rigor. También debía controlar que el trazado de las calles siguiera los planos originales, asignar solares y recaudar impuestos —la mayor parte del dinero de la reconstrucción se obtuvo imponiendo una nueva tasa a la entrada de carbón en el puerto—. Hooke estaba plenamente capacitado para controlar operarios y administrar grupos de trabajo, pues de alguna manera era algo que ya había estado haciendo antes.

Poco a poco, sus responsabilidades se fueron ampliando y pronto pasó de los controles e inspección de obras a la confección de planos originales, no solo de edificios sino también de ingeniería civil, ya que se encargó del alcantarillado, de las canalizaciones del agua, de la construcción de un muelle nuevo, de los puentes y, cómo no, de los nuevos relojes que lucían en las plazas públicas. De no haber hecho otra cosa en su vida, Hooke podía haber pasado a la historia como un arquitecto de prestigio.

Wren, que ya tenía antecedentes como arquitecto —había participado en el diseño de fortificaciones militares—, mostró tener una valía excepcional, y buena prueba de ello fue la construcción de la catedral de San Pablo, una de las más emblemáticas de la reconstrucción de Londres y la que le consagró como uno de los grandes arquitectos del siglo XVII.

Pero ese no era el caso de Hooke, que inició entonces una etapa inesperada de su vida profesional, revelándose a todas luces como un arquitecto de talento que tocó estilos y rangos arquitectónicos muy diferentes. Una de sus primeras obras fue el edificio del Real Colegio de Médicos, coronado por una impresionante





FOTO SUPERIOR:
Tras el gran incendio de Londres de 1666, Robert Hooke fue designado topógrafo de la ciudad. En esta pintura se le muestra midiendo y estacando las calles para iniciar la reconstrucción. El original es un óleo pintado por Rita Greer en 2008.

FOTO INFERIOR:
Monolito en memoria de Hooke, situado en Hooke Hill, en el lugar donde estaba situada la casa donde nació. Freshwater, isla de Wight, Inglaterra.

cúpula octogonal que en un principio fue atribuida a Wren; sin embargo, una documentación aparecida en 1890 en la Guildhall Library corroboró la autoría de Hooke. Entre sus grandes obras hay que contar con el Ragley Hall, Warwickshire, varios hospicios, y partes de la Mole Tánger. También construyó grandes mansiones, como la del doctor Richard Busby, su antiguo mentor.

Hooke fue también el inventor de las ventanas de guillotina, que ahorraban una considerable cantidad de espacio y que tan populares llegaron a ser en Inglaterra, pero sus mayores creaciones independientes fueron los magníficos edificios del Real Colegio de Médicos, acabado en 1679, y del Hospital de Bethlem (Bedlam Hospital), su obra maestra y punto de referencia para la arquitectura londinense de siglos posteriores. El Bedlam era una institución para enfermos mentales, el mejor manicomio que se había construido nunca en Europa, y probablemente por aquel entonces en el mundo. Haciendo referencia a esta institución, en los corrillos de la época se decía que los ingleses alojaban a sus lunáticos en recintos en los que los franceses alojarían a sus reyes. Era un edificio que recordaba a los castillos franceses con una impresionante fachada de 540 metros. En su diseño, Hooke no solo trató de impresionar a propios y extraños, sino que se ocupó de sus funcionalidades, como el tamaño, el saneamiento y la distribución de las habitaciones y de las salas de terapia. Bedlam fue un modelo en el que durante más de dos siglos se basaron los sanatorios mentales y también muchos balnearios de institución mental para los dos siglos siguientes. Bedlam fue destruido a principios del siglo XIX, una época en la que los manicomios eran un sucedáneo de las cárceles y obviamente Bedlam no reunía las necesarias condiciones de seguridad.

Pero esta no fue la única de las obras de Hooke que desapareció. De hecho, de toda su brillante carrera como arquitecto solo nos queda la iglesia de Santa María Magdalena y el monumento al gran incendio, que también durante mucho tiempo fue atribuido a Wren.

Volvemos al asunto del extraño maleficio que trata de borrar de la historia a Hooke. Lo suyo desaparece, por derribo, reconstrucción e incluso en los bombardeos de la Segunda Guerra Mundial, y lo que queda se atribuye a otros.

Durante el largo período que Hooke ejerció como arquitecto de la reconstrucción la Royal Society le reclamó asuntos pendientes. No estaba dedicando suficiente tiempo a la Sociedad. Eso es cierto a medias, ya que mientras ejercía tareas de inspector, diseñó y dirigió la construcción de nuevos edificios, también se ocupó de la paralaje de las estrellas, de la función fisiológica de la respiración, de la construcción de relojes o de la formulación de la fuerza recuperadora en los cuerpos elásticos.

De todas maneras, a esas alturas, Hooke ya no era el chico de los recados, ni tampoco el ayudante que arreglaba telescopios o al que se le podía encargar la construcción de un dispositivo que nadie hubiera hecho antes para que las piezas de un laboratorio encajaran. Ni tampoco era el mismo *curator* que debía compaginar lo interesante y lo espectacular en sus demostraciones científicas, que tenía que instruir a unos mientras entretenía a otros. En esos momentos Hooke era un científico de cierto renombre, y no solo eso, ya que después de haber trabajado como arquitecto se había convertido en un ciudadano con una posición económica nada desdeñable.

> «Me doy más que por satisfecho con haber establecido los mínimos fundamentos sobre los que otros puedan levantar más nobles estructuras [...]»
>
> — Robert Hooke.

En cuanto a la extrañeza que en algunas personas pueda producir el que de un perfil profesional como el de Hooke pueda surgir la figura de un famoso arquitecto, hay que pensar también que Christopher Wren, la figura emblemática de la reconstrucción, ideó en 1657 un nuevo método de transfusión de sangre que experimentó con éxito entre dos perros. Esto por poner un ejemplo muy alejado de la actividad propia de un arquitecto. Y es que este era el talante de los hombres que acudían en la década de 1650 a las reuniones periódicas del Colegio Invisible. Sus agitadas mentes se movían en el espacio de total libertad que ellos mismos habían creado y se fijaban sus propias metas. Eran experimentadores natos movidos por un afán de curiosidad que

no conocía más fronteras que las que la naturaleza interponía en cada momento en su camino.

La faceta de Hooke como arquitecto, a pesar de estar perfectamente documentada, es de las que menor difusión han tenido y a muchos les resulta sorprendente que se hable de Robert Hooke como arquitecto. En el terreno de la arquitectura, tuvo ocasión de aunar dos de sus cualidades destacadas, como son las de artista —no olvidemos que era un buen dibujante y un pintor que conocía bien las técnicas de este arte menos conocidas— y también la de científico. Fue precisamente en esta última vertiente que hizo la que puede ser considerada como una de las aportaciones más importantes a la historia de la arquitectura moderna.

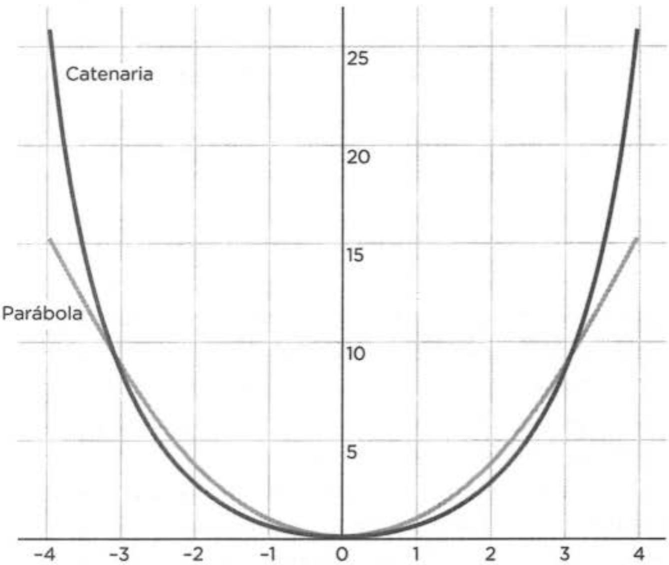
LA CATENARIA

El término «catenaria» proviene del latín *catena*, que quiere decir cadena. Si tomamos una cadena por sus extremos y dejamos que cuelgue, sin tensarla, se observa que adopta una forma curva, y esa curva es precisamente la que recibe el nombre de catenaria. Es importante el hecho de que la cadena cuelgue «a su aire», es decir, que no esté sometida a ninguna otra fuerza que no sea la del peso. Aparte de las cadenas, hay muchas cosas que adoptan la forma de una catenaria, como por ejemplo un cable o una cuerda gruesa. En términos más técnicos, las condiciones que se requieren para que un objeto de estas características, ya sean cadenas, cables o cuerdas, adopte la forma de una catenaria cuando se le cuelga por los extremos son dos: primero, que sea inextensible, es decir, que su longitud, o la de cualquiera de sus partes, no varíe aunque se vea sometida a tensiones. La otra condición, algo más sofisticada, es que sea de rigidez flexional nula, lo que significa que el objeto no flexione —que no se pueda torcer—, ya que de otra forma no estaríamos hablando de una curva plana. Estas condiciones ideales no se dan en la realidad, pero las aproximaciones son, en general, lo suficientemente buenas como para poder hablar con propiedad de catenarias.

Estas son condiciones físicas que permiten definir con mayor o menor precisión lo que es una catenaria, pero que no proporcionan, de momento, algo tan importante como lo es la ecuación matemática, ya que, para cualquier curva, cuando se conoce su ecuación se puede saber qué tipos de curvas de la misma clase hay, de qué depende el que sean más abiertas o cerradas, qué longitud tienen entre dos cualesquiera de sus puntos, qué distancia hay hasta su extremo inferior, cuál es el área que encierran y otras cuestiones por el estilo. Así, el primer problema que hay que resolver es el de hallar su ecuación, algo que casi nunca es sencillo y cuya solución suele tener un recorrido histórico más o menos largo y, en general, bastante interesante.

Decir que los griegos tenían conocimiento de la existencia de la catenaria es casi como no decir nada, pues ellos habían observado todo lo que se podía observar y habían reflexionado sobre cualquier cosa que fuera pensable. Si acortamos el proceso histórico y nos saltamos a Leonardo da Vinci, podemos conside-

FIG. 1



Las curvas catenarias y las parábolas son muy parecidas. En las proximidades del origen son casi indistinguibles.

LA ECUACIÓN DE LA CATENARIA

En 1669, el matemático alemán Joachim Jungius logró demostrar que la catenaria no era una parábola, algo que también hizo, de manera totalmente independiente, el suizo Jakob Bernoulli, miembro de una prolífica familia de matemáticos. El caso es que ni uno ni otro lograron hallar la ecuación de la catenaria. La situación se encontraba en el siguiente punto: se sabía lo que no era, pero no lo que era. En 1690, Jakob Bernoulli propuso encontrar la ecuación de la catenaria como problema en la *Acta eruditorum*, una de las más prestigiosas publicaciones de la época, y lo hizo en los siguientes términos:

> Encontrar la forma que toma una cuerda o cadena, perfectamente flexible y homogénea, por la acción de solo su peso, si sus extremos son fijos.

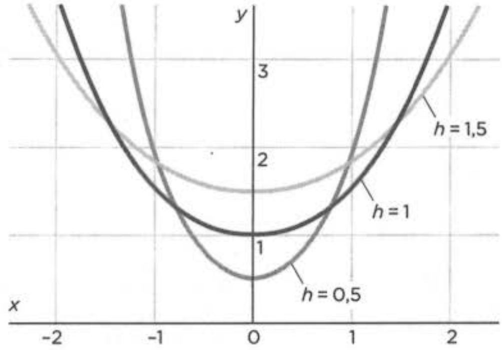
El reto estaba lanzado —se hablaba solo de cadenas y de cuerdas porque en aquella época no existían los cables—. Todo esto sucedía a finales del siglo XVII, época en la que, de la mano de Newton y Leibniz, nacía el cálculo, una de las herramientas más poderosas de la matemática. La física se había matematizado y muchos problemas que hasta entonces se habían planteado en términos puramente mecánicos empezaban a encontrar su formulación matemática.

Los descubridores

La ecuación de la catenaria la encontraron en 1691 tres matemáticos que trabajaron de forma independiente. Uno de ellos, como no, fue el mismo Leibniz. Otro fue Christiaan Huygens, que a los diecisiete años ya había demostrado que no se trataba de una parábola. El tercero fue Bernoulli, pero no Jakob, que era el que había propuesto el problema en la *Acta eruditorum*, sino su hermano pequeño Johann, lo que acabó creando un pequeño conflicto familiar en torno a la autoría de la solución. La ecuación de la catenaria es la siguiente:

rar a Galileo como al primero que llevó a cabo un estudio formal de la catenaria, cuyos resultados publicó en 1638 en una obra titulada *Diálogos sobre dos nuevas ciencias*. Sin embargo, a pesar de que era un científico de una gran sagacidad, Galileo erró el tiro y llegó a la conclusión de que la curva en cuestión era una parábola. Hay que decir en su favor que la catenaria y la parábola se parecen mucho (figura 1, en la página anterior), son realmente difíciles de distinguir sin los dispositivos de precisión que proporciona el análisis matemático y que todavía no eran conocidos

$$y = h \cdot \cosh\left(\frac{x}{h}\right) = \frac{h}{2} \cdot \left(e^{x/h} + e^{-x/h}\right).$$



Representación de tres catenarias, en las que *h* (constante para cada catenaria) es el parámetro que indica cuán rápidamente se abre la curva.

La parábola y la catenaria se parecen tanto porque en sus respectivos desarrollos en series de potencias, ambas coinciden en sus tres primeros términos $y = a + bx + cx^2$; por lo tanto, cuanto más cerca estemos del vértice, más parecidas son. Fue Huygens quien bautizó a esta curva con el nombre de catenaria, y Jakob Bernoulli el que la rebautizó con el nombre de *vélaire*. Una vela rectangular sujeta por dos mástiles horizontales, uno arriba y otro debajo, adopta la forma de una catenaria cuando el viento sopla perpendicular a ella.

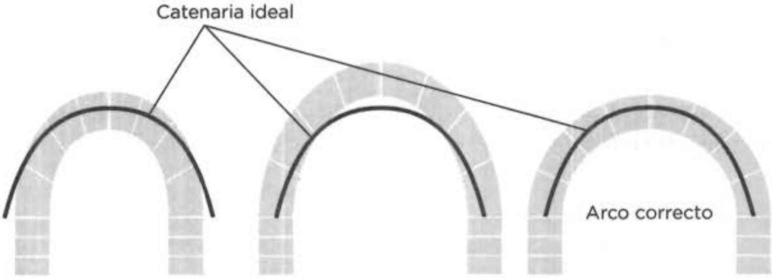
en la época de Galileo. Además, por aquel entonces, el ilustre científico italiano estaba prácticamente ciego y tenía setenta y cuatro años, una edad muy avanzada para la época.

Dejemos por un momento la curva catenaria y centrémonos en uno de los problemas más importantes que se ha planteado la arquitectura desde sus comienzos: la sustentación de arcos.

Se tardó varios siglos en saber que la catenaria era la forma óptima que debe adoptar un arco para que se sustente a sí mismo. Sin embargo, está demostrado que la intuición precede

SUSTENTACIÓN DE ARCOS

El físico inglés Thomas Young —que ejercía de médico—, famoso por el experimento de la doble rendija y por descifrar los jeroglíficos de la piedra Rosetta, escribió en 1845 un método práctico para la construcción de arcos, en el que se explica con todo detalle cómo deben construirse los arcos catenarios. Y fue así como se construyeron a partir del siglo XVII en toda Europa, siendo conocido el uso que el arquitecto catalán Antoni Gaudí (1852-1926) hizo de esta técnica, empleando sacos de arena que colgaban de cables para definir la curva que debían tener sus arcos. Es curioso ver maquetas de la Sagrada Familia o de la Colonia Güell en la que todo aparece boca abajo —el mundo al revés—. Es un error muy difundido el pensar que esta técnica la inventó el propio Gaudí, ya que data del siglo XVII y fue definitivamente adoptada por David Gregory (1659-1708) en 1697: para la construcción de un arco, la forma ideal es la de la catenaria. ¿Qué ocurre cuando el arco no tiene la forma de una catenaria? Se mantiene en pie en la medida en que la catenaria ideal quede contenida dentro del arco.



Para que un arco se sustente, la catenaria definida por los empujes debe estar contenida totalmente en el interior del arco.

siempre al conocimiento. No obstante, una cosa es intuir algo y otra muy distinta tener la certeza de que las cosas funcionan de una manera determinada. La experiencia proporciona datos a base de errores. Existe un arco catenario que data de muy antiguo, el Taq-i Kisra, de Ctesifonte, una ciudad de la antigua Persia (actual Irak). Gran parte del castillo está en ruinas, pero el arco sigue en pie.

LA SOLUCIÓN DE HOOKE

¿Cuál es la forma ideal que debe tener un arco para que haga todo lo que esperamos de él, es decir, para que no se derrumbe bajo su peso? Esta es la pregunta que se formuló Robert Hooke en 1670. Un año después afirmó que ya tenía la respuesta, pero por algún motivo desconocido no se lo contó a nadie. No fue hasta cinco años más tarde que en el apéndice de una obra titulada *A Description of Helioscopes* (1676) escribió la solución a su pregunta:

abcccddeeeeefggiiiiiiiillmmmmnnnnnooprrsssttttttuuuuuuuux.

Como ya había hecho en ocasiones anteriores, Hooke utilizó un lenguaje encriptado. En cualquier caso, esta actitud no es de extrañar en alguien que a lo largo de su vida había visto cómo los demás le robaban sistemáticamente sus ideas en un entorno muy poco favorable y que casi nunca salió en su defensa. El caso es que Hooke no quiso que la solución de este anagrama se conociera hasta después de su muerte, momento en que se dispuso de la clave para descifrar su mensaje. Está en su testamento y fue su albacea quien la publicó:

Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum,

lo que traducido viene a decir algo así como «igual que cuelga un hilo flexible, pero invertido, se sostendrá un arco rígido». Con este testamento, Hooke nos legó uno de los descubrimientos más importantes de la historia de la arquitectura.

Dicho de manera sencilla: si queremos construir un arco con un trozo de cable, lo que debemos hacer es suspenderlo por sus extremos y darle la vuelta; de esta manera, el cable tiene la forma de una catenaria y es capaz de sustentarse a sí mismo.

¿Quiere decir esto que si construimos un arco con forma de catenaria se sustentará sin necesidad de tirantes, soportes o contrafuertes de ninguna clase? La respuesta es sí. Buena prueba de ello es el Jefferson National Expansion Memorial construido en

ARCOS CATENARIOS

Una razón por la que no se utilizaban arcos catenarios en la Antigüedad radicaba en la dificultad de su construcción. Para construir algo, primero hay que disponer de un plano, y un plano es algo que hay que dibujar. Es muy sencillo dibujar una circunferencia, basta con un lápiz y una cuerda. El caso de una parábola es algo más complicado, ya que requiere de una herramienta adicional, como es el cartabón o la escuadra, pero se puede hacer con bastante precisión. En cambio, una catenaria es harina de otro costal, ya que se trata de una curva trascendente, no de un lugar geométrico tan sencillo como los dos anteriores. Recordemos, sin embargo, que la catenaria y la parábola son muy parecidas, por lo que en algunos casos la elección de una u otra podría tener pocos efectos en la resistencia del arco.



Arco catenario del monumento nacional conmemorativo de Estados Unidos en San Luis, Misuri. La construcción recuerda la primera expedición terrestre que partiendo desde el este de Estados Unidos alcanzó la costa del Pacífico.

la década de 1960 en la ciudad de San Luis, Misuri, que entonces fue el monumento más alto de Estados Unidos.

EL GEÓLOGO

Se suelen hacer pocas menciones al trabajo que Hooke desarrolló en el terreno de la geología y fue, sin embargo, de los más importantes de su carrera como científico y a uno de los que más tiempo dedicó. Estableció las bases para el desarrollo posterior de teorías que científicos notables le plagiaron sin mencionar siquiera su nombre.

Hooke fue el primero en proponer un origen orgánico de los fósiles. En la observación XVII de la *Micrografía*, Hooke escribe:

> Por todo lo cual y otros diversos pormenores que he observado, no puedo dejar de pensar que todos estos y la mayor parte de los cuerpos pétreos que se encuentran con estas extrañas formas deben su formación y configuración no a ningún tipo de *virtud plástica* inherente en la tierra, sino a las conchas de ciertos moluscos que, sea por algún diluvio, inundación, terremoto u otros medios por el estilo, fueron arrojadas a ese lugar, siendo rellenadas allí por algún tipo de barro o arcilla o agua *petrificadora*, o alguna otra sustancia que con el paso del tiempo se ha sedimentado y endurecido en esos moldes de concha [...].

En la época en que Hooke lanzó esta propuesta, se creía que la formación de fósiles era debida a una cualidad plástica procedente del interior de la tierra capaz de imitar formas naturales. Es la virtud plástica a que Hooke hace mención en el anterior párrafo y que no tiene reparos en tratar de pueril.

Las teorías geológicas que propuso Hooke no solo chocaban de frente con la visión del mundo aportada por la ciencia, sino también con la concepción teológica vigente de la época, ya que Hooke afirmó, por comparación con otros organismos, que los fósiles son restos de organismos vivos extinguidos, lo que era un concepto absolutamente inaceptable para la teología vigente. Una de las primeras preguntas con las que se enfrentó Hooke, a la que cabe responder, es la de la localización de estos fósiles. ¿Cómo es posible que encontremos una concha marina en lo alto de una montaña? Para Hooke, el diluvio universal no era, como afirmaba la Biblia, algo que aconteció durante un breve período de tiempo, sino que durante cientos o miles de años la Tierra estuvo totalmente inundada. Posteriormente, debido a movimientos geológicos internos emergieron las montañas. Incluso afirmaba que el relieve terrestre se había visto sometido a grandes cambios a través de los siglos, debido a los terremotos y los volcanes.

Todas estas teorías son explicadas con más detalle en una obra posterior a la *Micrografía*, incluida en una serie de con-

ferencias impartidas entre 1667 y 1669 y que llevaba por título «Conferencias y discursos sobre terremotos y erupciones subterráneas explicando la causa de la cara rugosa y desigual de la tierra, y qué razones se pueden dar a los hallazgos frecuentes de depósitos y otras sustancias petrificadas en el mar y la tierra, dispersas en toda la superficie terrestre».

«[...] los espíritus o sustancias incorpóreas, aunque existan, no pueden, no obstante, no estar en ninguna parte; y, si están en alguna parte, no son espíritus, sino que es necesario que sean sustancias corpóreas.»

— Robert Hooke.

El paso siguiente que dio Hooke fue sin duda el más audaz de todos. Primero, propuso buscar especies extinguidas en fósiles que se encontraran en los lugares más recónditos del mundo. Luego se planteó que comparando estas especies con las actuales se podía llegar a la concusión de que, a través del tiempo, determinados organismos vivos, en vez de extinguirse, pudieron sufrir cambios y que estos cambios fueron debidos a las transformaciones del medio, afirmando textualmente que «las variaciones del clima, del suelo y de la alimentación producen a menudo un cambio en los cuerpos que las soportan».

Según algunos historiadores de la ciencia, Hooke estaba sustentando una teoría evolucionista que habría de servir de base para que doscientos años después el naturalista inglés Charles Darwin (1809-1882) estableciera su teoría sobre el origen de las especies.

LOS ÚLTIMOS AÑOS

Robert Hooke no llegó a casarse nunca. Las únicas relaciones sentimentales que se le conocen, las mantuvo siempre con mujeres de menor edad y de más bajo estrato social, lo que incluía,

básicamente, a las personas que estaban a su servicio. Hooke fue siempre una persona socialmente acomplejada, tanto por su aspecto físico como por el trato un tanto degradante que recibió a lo largo de su vida. En cierta forma, quizá esto podría explicar el porqué sus relaciones amorosas quedaron circunscritas al ámbito doméstico. Pero no hay que ver en estas circunstancias algún tipo de perversión o sometimiento, ya que hay constancia de que Hooke trató siempre muy bien a todos aquellos que de una forma u otra dependieron de él.

El carácter acomplejado y retraído de Hooke se ceñía únicamente a sus relaciones más íntimas, ya que fuera de ese ámbito fue una persona muy sociable, con muchos amigos, aficionado a los cafés, el tabaco y las tertulias, aunque ciertamente dentro de un círculo restringido de personas que de alguna manera fueran intelectualmente afines.

Sin embargo, hay que destacar una relación que para Hooke revistió gran importancia, la que mantuvo con su sobrina Grace, hija de su hermano mayor John. La historia de su hermano es un tanto turbulenta. Al parecer, tuvo dificultades económicas y en 1672 envió a su hija a Londres para que viviera con Robert cuando ella tenía tan solo diez años. Se supone que las intenciones del padre fueron que encontrara en los ambientes de la gran ciudad mejores ocasiones de consumar un matrimonio ventajoso. John enviaba regularmente ciertas cantidades de dinero para su manutención, hasta que un día dejó de hacerlo. Entonces se invirtieron los papeles y fue Robert el que empezó a prestar dinero a su hermano. El 27 de marzo de 1677, por motivos que se desconocen, John se suicidó en extrañas circunstancias, colgándose de una viga de su casa.

En 1672, Hooke empezó a escribir un diario. No parece que tuviera la más mínima intención de publicarlo, pues no fue editado hasta 1935. Se trata de un texto muy personal, íntimo, con anotaciones muy breves, en el que unas curiosas marcas, muy parecidas al signo de piscis, dan testimonio de los días en los que mantenía relaciones sexuales con alguna de las mujeres de su servicio o con Grace, a la que llegada la adolescencia convirtió en su amante.

Grace debió de ser una mujer muy atractiva, a tenor de las atenciones y del número de pretendientes que tuvo, entre los que se encontraba sir Thomas Bloodworth, el que fuera alcalde de Londres en el momento del gran incendio. Hooke siempre tuvo un trato exquisito con ella. La matriculó en una escuela y le compró vestidos y joyas. En definitiva, se comportó como un amante y como un protector. Cuando Grace falleció en 1687, Hooke se sumió en una depresión de la que ya nunca pudo salir.

En los últimos años, la salud de Hooke se vio muy afectada. Probablemente era diabético, se quedó ciego y tuvo problemas circulatorios graves que le afectaron a las piernas, hasta el punto de que el último año de su vida lo pasó postrado en el lecho. Murió el 3 de marzo de 1703 en sus aposentos del Gresham College. No dejó testamento, aunque se encontró un baúl con algunos bienes y una nada despreciable cantidad de dinero —cerca de 9580 libras—. Hay quien ha querido ver en esto la imagen de un avaro que atesoraba monedas en un arca, pero una lectura más en acorde con su personalidad lleva a pensar en alguien que no daba excesiva importancia al dinero.

A su muerte, Newton fue nombrado presidente de la Royal Society. Se decía entonces que, aún veinte años después de la muerte de Hooke, Newton se ponía enfermo nada más oír su nombre. Así, no es de extrañar que se ocupara de que la biblioteca y el laboratorio de Hooke, con todo lo que había dentro, desaparecieran tras su muerte. En 1710, la sede de la Royal Society fue trasladada desde el Gresham College a Crane Court. Entre todos los objetos que se incluían en la mudanza estaban los retratos de los miembros de la Sociedad. Se conservan todos excepto el de Hooke, que desapareció en el traslado. Newton fue el encargado de supervisar la mudanza...

Hooke fue enterrado en la iglesia de Santa Elena, en Londres, junto con los restos de su sobrina Grace. En 1892 se llevó a cabo una restauración de la iglesia y los cuerpos de todas las personas distinguidas que habían sido enterradas allí fueron trasladados a otro cementerio. Pero en la lista final no figuran los nombres de Hooke, ni de Grace, de manera que sus restos fueron exhumados, pero a día de hoy todavía no se sabe a dónde fueron a parar. Aun

LAS MINUTAS PERDIDAS DE LA ROYAL SOCIETY

El 28 de marzo de 2006, un portavoz de Bonhams, una de las empresas de subastas británica más importante del mundo, anunció que iba a ser subastado un documento que había permanecido perdido durante siglos. Se trataba de un manuscrito de 520 páginas cuyo autor era Robert Hooke y que había aparecido en Hampshire, en casa de un particular que lo conservaba en el fondo de un armario. El documento salió en el remate final de la subasta y fue adquirido por un comprador anónimo de la Royal Society de Londres por un millón y medio de euros. El manuscrito contenía los informes de las reuniones mantenidas por la Sociedad desde 1661 hasta 1691. Los expertos en historia de la ciencia lo consideran el documento más valioso que se ha obtenido en esta generación por parte de la Royal Society. En dicho escrito, Hooke afirma explícitamente que tanto Newton como Boyle le robaron sus ideas.

así, una vez restaurada la iglesia se construyeron unas vidrieras policromadas en las que figuraban las imágenes de algunos personajes ilustres, entre los que estaba Hooke. Se trataba de una imagen que se sabía que en absoluto se correspondía con la realidad, pero al menos quedó para el recuerdo.

En abril de 1992, el IRA hizo explotar una bomba en Londres, en las inmediaciones de la iglesia de Santa Elena. La deflagración hizo volar la vidriera en pedazos. Fue sustituida por un simple cristal.

EL PENSAMIENTO CIENTÍFICO DE HOOKE

El nacimiento de la Nueva Ciencia tuvo lugar en la primera mitad del siglo XVII y se desarrolló en un escenario en el que el animismo todavía estaba presente como herencia directa de una visión mágica del mundo, ya sea por influencias religiosas o por el hermetismo tradicional que se mantenía muy presente en campos como la astrología o la alquimia, e incluso en la misma matemática. Era una época a caballo entre dos visiones del mundo. Por un lado,

la metafísica, que consideraba que la materia había sido creada con propiedades concretas, con un «espíritu» que es el que va a determinar su comportamiento. La observación experimental debe servirnos para intuir ese espíritu y así conocer las leyes que gobiernan sus actos. Por otro lado, estaba la corriente mecanicista, inaugurada por Descartes, según la cual todo puede ser explicado mediante procesos mecánicos que tienen su razón de ser en sí mismos, sin necesidad de buscar explicaciones más allá de la física. Robert Hooke fue uno de los más claros defensores de esta segunda corriente de pensamiento.

En ese contexto, los instrumentos que Hooke creó como extensión de nuestros sentidos adquirieron una dimensión más profunda, ya que no solo permitieron mejorar nuestra percepción de la realidad, sino que también modificaron nuestra concepción de la misma. Con un nuevo telescopio no solo pudo medir la paralaje anual de una estrella, algo que por sí mismo tiene un gran valor como logro experimental, sino que además consiguió una prueba irrefutable del movimiento de traslación alrededor del Sol. Cuando construyó su microscopio, también mostró un mundo desconocido al que hasta entonces todos habían permanecido ciegos. Pero no se limitó a describir ese mundo con todo lujo de detalles, sino que también investigó y buscó explicaciones, quería saber por qué los líquidos ascienden por tubos delgados, por qué la combustión de una vela tiene zonas calientes y zonas frías. Ya no le valían las explicaciones animistas que afirmaban que los gases tienen «miedo» del vacío, quería razonamientos mecánicos en los que estuvieran implicadas las partículas que conforman los gases, sujetas a velocidades que pueden sufrir cambios que, al final, se iban a reflejar en el comportamiento de esos gases.

La pregunta de fondo que está presente es la siguiente: ¿se pueden explicar todos los fenómenos conocidos recurriendo únicamente a la mecánica? ¿O posee esta una limitación intrínseca, una barrera infranqueable, que nos impedirá conocer la verdad?

La postura de Hooke ante esta pregunta es clara y sin ambigüedades: el único conocimiento que podemos alcanzar proviene de los experimentos y de los razonamientos basados en la mecánica capaces de explicarlos. Esta visión de la ciencia encontró

una fuerte oposición en una época en la que la metafísica todavía estaba arraigada en la filosofía natural, la madre adoptiva de la física que nació en el siglo XVII y que perdura hasta nuestros días.

El razonamiento básico que entonces se esgrimía frente al mecanicismo —y que actualmente algunos pensadores todavía sostienen— era que la explicación última de los fenómenos hay que buscarla en las leyes de la Creación y no en los limitados resultados de los laboratorios, de los que podemos obtener algunos beneficios inmediatos, pero que también pueden embotar nuestra intuición para el conocimiento de verdades superiores. Lo que parece claro —al menos Hooke era muy consciente de ello— es que el debate afecta al paradigma científico tanto como al religioso.

Si todos los fenómenos de la naturaleza pueden ser explicados de forma mecánica sin la presencia de extraños espíritus que actúen en ellos, es muy probable entonces que dichos espíritus no existan. Qué duda cabe de que este planteamiento iba a generar un conflicto, ya no filosófico, sino de índole religiosa, ya que la presencia de Dios en este nuevo planteamiento resultaba irrelevante. Hay que tener presente que en los tiempos de Hooke, cualquier forma de ateísmo estaba fuera de lugar en los entornos sociales en los que se movía, lo que justifica en algunos de los escritos de Hooke la mención a la Divinidad en contextos que ahora nos parecerían fuera de lugar, menciones que deben atribuirse más a lo «políticamente correcto» antes que a una creencia profunda.

Aun así, Hooke dejó una puerta abierta a la intuición cuando esta juega un papel puramente especulativo fuera del ámbito experimental. En las tertulias de los cafés, en los paseos, en su habitación del Gresham College, Hooke dejaba volar su imaginación en total libertad, pero cuando entraba en el taller y «sometía la naturaleza a tortura» se ceñía con todo rigor a aquello que los sentidos le mostraban, ya fuera con sus manos, con sus ojos o con el sexto sentido que sus ingeniosos artilugios le permitían percibir. Entonces, su pensamiento se circunscribía al rigor mecanicista y transcribió en el papel las leyes que la naturaleza le dictaba. Esta manera de hacer fue lo que convirtió a Robert Hooke en una de las figuras más representativas de la Nueva Ciencia del siglo XVII.

Lecturas recomendadas

BROWN, F., *Física de los sólidos*, Barcelona, Editorial Reverté, 1970.

DERRY, T.K., *Historia de la tecnología*, Madrid, Siglo XXI, 1995.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HOOKE, R., *Lecciones de potencia restitutiva o el resorte*, Torrejón de Ardoz (Madrid), Ed. Alpuerto-INTEMAC, 1977.

—: *Micrografía*, Barcelona, Círculo de Lectores, 1995.

KLINE, M., *El pensamiento matemático de la Antigüedad a nuestros días*, Madrid, Alianza, 1994.

LOMAS, R., *El Colegio Invisible*, Barcelona, Grijalbo, 2003.

MARTÍN ASÍN, F., *Astronomía*, Madrid, Paraninfo, 1982.

NEWTON, I., *Principios matemáticos de la filosofía natural y su sistema del mundo*, Madrid, Editora Nacional, 1982.

ROBINSON, P. y HEWITT, P., *Física conceptual*, Madrid, Pearson, 1998.

VALERA, M., *Hooke. La ambición de una ciencia sin límites*, Tres Cantos (Madrid), Nivola, 2009.

Índice